

65897

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU KAYNAĞI YAPILMIŞ MİLLERİN YORULMA
ÖMRÜNÜN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADNAN ÇALIK

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ

1997

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLGU KAYNAĞI YAPILMIŞ MİLLERİN YORULMA
ÖMRÜNÜN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

ADNAN ÇALIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez / / 1997 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman
Doç. Dr. Ayşen HAKSEVER

İmza

İmza

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi
Dolgu Kaynağı Yapılmış Millerin Yorulma Ömrünün
Deneysel Olarak Araştırılması
Adnan ÇALIK
Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
1997 Sayfa 57

Dolgu kaynağının amacı aşınma ya da yorulma ile hasara uğramış makina elemanlarının onarılarak yeniden kullanıma alınması ve böylece ekonomik kazanım elde edilmesidir. Bu çalışmada, mil imalatında kullanılan martenzitik paslanmaz çeliklerinin kaynaklı yorulması incelenmiştir. Çalışmanın amacı, yorulma ile hasara uğramış bu malzemeden millerin dolgu kaynağı ile onarılması halinde, yorulma davranışlarını belirlemektir.

Bu maksatla, dökülmüş ve dövülerek levha haline getirilmiş AISI 422 martenzitik paslanmaz çelikten DIN 32525-1'e göre hazırlanmış numunelere 13 pasoda paslanmaz çelik elektrod ile dolgu kaynağı yapılmıştır. Kaynak, ön tavlama temperleme ve ısıt işlemsiz olarak numunelere gerçekleştirilmiştir. Çekme ve yorulma testleri yapılmış ve metalografik muayene ile iç yapı incelenerek, kaynak bölgesinin sertlik değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın 1. bölümünde konuya giriş yapılmış, 2. bölümünde yorulma mekanizması, yorulmaya tesir eden faktörler, yorulma türleri ve yorulma dayanımının belirlenmesi ile ilgili literatür araştırması sunulmuştur. 3. bölümde kaynaklı birleştirmelerin yorulma özellikleri anlatılmıştır. 4. bölümde martenzitik paslanmaz çelikler ve bu çeliklerin kaynağı hakkında bilgi verilmiştir. 5. bölümde deneysel çalışmalar anlatılmıştır. 6. bölümde sonuçlar verilmiştir. 7. ve son bölümde deneysel çalışmalar ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

SUMMARY

MSc Thesis

Investigation of The Fatigue Life of The Fillet - Welded Shafts

Adnan ÇALIK

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy Education

1997 Page 57

The aim of the fillet welding is to repair the machine element or component worn or fatigued and thus reusing it.

In this study, the welded-fatigue life of martensitic stainless steel used in producing of shafts was investigated. The aim of the study is to determine the fatigue life of the fillet welded martensitic-steel shafts.

With this aim, the casted and forged specimens from AISI 422 martensitic stainless steel prepared according to DIN 32525-1 were applied fillet-welding with shielded stainless steel electrodes in 13 passes. The welds were applied with or without heat treatment. The heat treatments were tempering and pre-heating. The third specimen was welded without heat treatment. These specimens were then applied tensile and fatigue tests and the hardness of the welding region was measured by examining the microstructure.

In the First chapter of the study the subject is introduced. In the second chapter, the mechanism of fatigue, the factors effecting fatigue and the methods of determining fatigue life are given. In the third chapter information about martensitic stainless steels and their welding are presented. In the forth and final chapter the experiments and their results are given. In this chapter there results are evaluated as well.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlatılmasına, yürütülmesine ve tamamlanmasına her türlü desteği sağlayan bölüm başkanım ve danışman hocam Doç. Dr. Ayşen HAKSEVER'e, deneylerin bilimsel metodlara uygun olarak yapılmasında sürekli desteğini gördüğüm Yrd. Doç. Dr. Nuri ORHAN'a, yine yetişmemde büyük emekleri geçen Muş Meslek Yüksekokulu Müdürü Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a, deney malzemelerinin dökümünü gerçekleştiren Günhan Çelik Döküm A.Ş.'ne, kaynakların yapılmasını gerçekleştiren teknik öğretmen Ercan TUNÇ'a, deneylerin hazırlanmasında bizzat çalışan Öğr. Gör. Mehmet YAZ'a, yorulma deneylerinin kendi makinalarında yapılmasına izin veren S.D.Ü. Makine Mühendisliği Bölüm elemanlarına ve Doç. Dr. Remzi VAROL'a ayrıca sürekli desteğini yanımda hissettiğim eşime de teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	I
SUMMARY	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X

I. BÖLÜM

1. GİRİŞ.....	1
---------------	---

II. BÖLÜM

2. YORULMA	2
2.1. Yorulma Mekanizması	6
2.2. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler.....	9
2.2.1. Gerilmenin Etkisi	9
2.2.2. Parça Boyutunun Etkisi	10
2.2.3. Yüzeyin (Yüzey Pürüzlülüğünün) Etkisi	10
2.2.4. Malzeme Şartlarının Etkisi	11
2.2.4.1. Tane Boyutunun Etkisi.....	11
2.2.4.2. Alaşımlamanın Etkisi.....	11
2.2.4.3. Çalışma Sertleşmesinin Etkisi.....	11
2.2.4.4. Isıl İşlemin Etkisi	12
2.3. Yorulma Dayanımını ve Belirlenmesi.....	12
2.3.1. Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	13
2.4. Yorulma Tipleri	14
2.4.1. Isıl Yorulma	14
2.4.2. Korozyon Yorulması	14
2.4.3. Fretting.....	15

2.5. Malzemelerde Yorulma Ömrünün Tayini	16
2.5.1. Yorulma Deneyi.....	17
2.5.2. Yorulma Testi	18
2.5.3. Yorulma Zorlanması	19
2.5.4. Yorulma ve Zorlanma Dayanımı.....	19
2.5.5. Yorulma Test Cihazları.....	20

III. BÖLÜM

3. KAYNAKLI BAĞLANTILARDA YORULMA	21
3.1. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler	21
3.2. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Dayanımını Yükseltmek İçin Alınacak Tedbirler	22

IV. BÖLÜM

4. MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI	23
4.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	23
4.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	25
4.3. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Alınacak Tedbirler ...	28

V. BÖLÜM

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5.1. Çalışmanın Amacı	31
5.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	32
5.2.1. Ana Metal	32
5.2.2. Kullanılan Kaynak Makinası.....	33
5.2.3. Kaynak Metalinin Çıkarılması.....	34
5.3. Çekme Deneyi	34
5.4. Yorulma Deneyi.....	35
5.5. Metalografik İncelemeler	36
5.6. Sertlik Ölçümleri	36

VI. BÖLÜM

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	37
6.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....	37
6.2. Metalografik Muayene Sonuçları.....	37
6.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	43
6.4. Yorulma Testi Sonuçları.....	46

VII. BÖLÜM

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	48
7.1. Metalografik Sonuçların Değerlendirilmesi.....	48
7.2. Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	51
7.3. Yorulma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	53
7.4. Değerlendirme ve Öneriler.....	54
8. KAYNAKÇA.....	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Demirli-Demirdışı Malzemelere Ait Wöhler Diyagramı.....	4
Şekil 2.2. Wood'un Mikrodeformasyon Teorisi	7
Şekil 2.3. Yorulma Deformasyonunda Malzemelerin Deformasyon Özelliklerinin Tayini.....	17
Şekil 3. Milin Çekme ve Basma Bölgesi.....	21
Şekil 4.1. Fe-Cr İkili Faz Diyagramı	24
Şekil 4.2. Tamamen Sertleşmiş Martenzitik Paslanmaz Çeliklerde Karbon Miktarı ile Sertlik Arasındaki İlişki	25
Şekil 4.3. Schaeffler Diyagramı	28
Şekil 5.1. DIN 32525-1'e Göre Numune Şekli ve Boyutları.....	32
Şekil 5.2. Çekme ve Yorulma Deney Numunelerinin Çıkarılışı.....	34
Şekil 5.3. Çekme Numunesi Ölçüleri	34
Şekil 5.4. Yorulma Deney Numunesi Ölçüleri.....	35
Şekil 5.5. Yorulma Makinasının Resmi	35
Şekil 6.1. Metalografik Muayene İçin Hazırlanmış, Temperli Numunenin Makroskobik Fotoğrafı	38
Şekil 6.2. Yorulma Numunesi ve Yorulma Sonrası Kırılmış Numunenin Fotoğrafları.....	38
Şekil 6.3. Orjinal Hasarlı Milin İç Yapısı X400	39
Şekil 6.4. Dökümden Sonra Dövülmüş Numunenin Mikro Yapısı X400.....	39
Şekil 6.5. Isıl İşlem Görmemiş Numunede a. Dikiş+ITAB (X100), b. Dikiş Kenarı (X400) c. ITAB+Ana Metal (X100)	40
Şekil 6.6. Ön Tavlanmış Numunede a. Dikiş+ITAB (X100), b. Dikiş Kenarı (X400) c. ITAB+Ana Metal (X100)	41
Şekil 6.7. Temperlenmiş Numunede a. Dikiş+ITAB (X100), b. Dikiş Kenarı (X400) c. ITAB+Ana Metal (X100)	42
Şekil 6.8. Isıl İşlemsiz Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı	43
Şekil 6.9. Isıl İşlemsiz Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı.....	43

VIII

Şekil 6.10. Ön Tavlı Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı	44
Şekil 6.11. Ön Tavlı Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı.....	44
Şekil 6.12. Temperlenmiş Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı	45
Şekil 6.13. Temperli Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı	45
Şekil 6.14. Isıl İşlemsiz Numunenin Yorulma Eğrisi.....	46
Şekil 6.15. Ön Tavlı Numunenin Yorulma Eğrisi.....	47
Şekil 6.16. Temperlenmiş Numunenin Yorulma Eğrisi.....	47
Şekil 7.1. Schaeffler Diyagramı Yardımıyla Dikişin Mikroyapısının Belirlenmesi	49
Şekil 7.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerde Karbon Oranına Bağlı Olarak Oluşan Yapının Sertlik Değerleri.....	49
Şekil 7.3. Kaynaklı Numunelerin ITAB'lerinde Mikroyapılar a. Isıl İşlemsiz, b. Ön Tavlı, c. Temperli (X100)	50
Şekil 7.4. Dikiş ve ITAB'de Toplu Sertlik Değerleri.....	52
Şekil 7.5. Dikişte Toplu Sertlik Değerleri Toplamı	52
Şekil 7.6. Toplu Yorulma Eğrileri	53

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Deney Malzemesinin Kimyasal Bileşimi	32
Tablo 5.2. Ana Metal ve Kaynak Bölgesi Ölçüleri.....	33
Tablo 5.3. Kullanılan Kaynak Makinası ve Elektrodun Özellikleri.....	33
Tablo 5.4. Elektrodun Kimyasal Bileşimi.....	33
Tablo 5.5. Çekme Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri.....	34
Tablo 6.1. Kaynak Yapılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri	37
Tablo 6.2. Yorulma Testi Sonuçları	46



SEMBOLLER LİSTESİ

Nf : Yorulma Kırılması (Çevirim Sayısı)

σ_{gn} : Genlik : Amplitüd Gerilmesi

σ_{og} : Ortalama Gerilme

σ_{alt} : Alt Gerilme

σ_{min} : Minimum Gerilme

$\sigma_{\checkmark}$: Çekme Gerilmesi

σ_{ak} : Akma Gerilmesi

YDS : Yorulma Dayanım Sınırı

BSD : Birim Sertlik Değeri

T : Zaman (Saniye)

$\Delta \epsilon_t$: Birim Şekil Değıştirme Aralığı

$\Delta \epsilon_{gn}$: Birim Şekil Değıştirme Genliğı

$\Delta \epsilon_{p1}$: Biçim Şekil Değıştirme Genliğı

D : Çap

Kt : Gerilme Yoğunlaşması Faktörü

HV : Vickers Sertlik

AISI : Amerikan Demir Çelik Enstitüsü

HB : Brinell Sertlik

μ_m : Mikrometre

DIN : Alman Standartları Enstitüsü

Ms : Martenzit Başlama Sıcaklığı

ITAB : Isının Tesiri Altındaki Bölge

1. BÖLÜM

1. GİRİŞ

Dolgu kaynağı ile makina elemanlarının onarılmasındaki temel amaç, aşınan ya da yorularak hasar gören bir makina elemanın hasarlı bölgesini uygun kaynak yöntemi ve elektrod ile doldurup işleyerek, yeniden üretime gerek kalmaksızın kullanıma sunmaktır. Böylece ekonomik kazanç sağlanmış olmaktadır.

Miller, dönerek hareket ve kuvvet ileten makina elemanlarından olduğundan, dinamik zorlanmalar sonucu sık sık yorulma ve aşınma hasarına maruz kalmaktadır. Hasar gördükten sonra dolgu yapılarak onarılmış millerin yorulma davranışlarını incelemek, uygulanan işlemin kalitesi ve uygunluğu hakkında bilgi vermektedir. Bu konuda yapılmış birçok araştırma mevcut olmasına rağmen, bilhassa kaynağı zor olan martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı bağlantılarının yorulma davranışı hakkında fazla bir çalışma yoktur.

Bu çalışmada, demiryolları lokomotifleri ile su pompalarında kullanılan ve sık sık kesme problemi ile karşılaşılan martenzitik paslanmaz çelik gurubundan AISI 422 çeliğinden millerin dolgu kaynağı yapılmış haldeki yorulma davranışı incelenmiştir.

2. BÖLÜM

2. YORULMA

Makina parçalarının çalışmaları esnasında periyodik olarak değişen yüklere maruz kalmaları sonucunda malzemelerde yorulma hasarları meydana gelmektedir.

Özellikle yüzeyi sürekli olarak değişen bir basınca maruz kalan parçalarda yüzeyin hemen altında oluşan yorulma çatlakları zamanla gelişir.

Yorulma, dinamik zorlamalar sonucunda ve malzemenin akma gerilmesinin çok altındaki gerilme değerlerinde meydana gelen hasar olarak da tanımlanmaktadır.

Literatürlerde çok çeşitli yorulma tanımları yapılmaktadır. Genel kullanım itibariyle yorulma kelimesi malzemelerin statik gerilme ve uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, tekrarlı gerilme ve uzamaların söz konusu olduğu durumlardaki davranışını belirtmek üzere kullanılmaktadır.

Yorulma ASTM 206-72 de aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır :

“Bazı nokta veya noktalarda tekrarlı gerilme ya da uzamaya maruz kalan malzemelerde, yeterli tekrar sayısından sonra çatlak oluşması, çatlak büyümesi ve bunun sonucunda malzemenin kırılmasına sebep olan kısmi ve sürekli gelişen kalıcı bir yapı değişikliği olayıdır.”

Görüldüğü gibi tanımlamada üzerinde durulan dört önemli özellik:

1. Olayın sürekli gelişmesi,
2. Lokalize (bölgesel) olması,
3. Çatlakların ilerlemesi,

4. Çatlakların büyümesi ve kırığın ortaya çıkmasıdır.

Uygulamada, makina parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler ile eğilme burulma momentleri etki ederler (Esin,1981).

Yorulma olayı numunenin morfolojik özelliklerine göre iki kategoriye ayrılabilir.

1. Çatlaksız Malzemelerde Yorulma : Çatlaksız malzemelerde yorulma, çatlak oluşumu ile kontrol edilir. Bu tip yorulmaya örnek olarak dişliler, akslar, krank milleri ve direksiyon millerindeki yorulmalar verilebilir.

2. Çatlaklı Malzemelerde Yorulma : Çatlaklı malzemelerde, olayın başında çatlak mevcuttur ve yorulma çatlak ilerlemesi ile kontrol edilir. Bu tip yorulmaya da büyük yapılar, kaynaklı konstrüksiyonlar, köprüler, gemiler ve basınçlı kaplardaki yorulma örnek olarak verilebilir.

Uygulanan gerilmenin şiddeti de yorulma ömrüne tesir ederek iki farklı yorulma meydana getirir.

1. Uzun Ömürlü (Çok Çevrimli) Yorulma : Uzun ömürlü ya da çok çevrimli yorulma, akma gerilmesinin altındaki gerilmelerin üstünde meydana gelir (N_f kırılma $> 10^4$). Bu tip yorulmaya titreşen ve dönen elemanlar, tekerlekler, akslar ve aşırı yüklenen parçalar örnek olarak verilebilir.

2. Kısa Ömürlü (Az Çevrimli) Yorulma : Yorulma, akma gerilmesinin üstündeki gerilmelerde olur ($N_f < 10^4$). Bu tip yorulmaya nükleer reaktörler, türbin parçaları, motor elemanlarında meydana gelir.

Yorulmada, malzemeye uygulanan kuvvet ve momentler iki türlü etki eder.

1. Yük kesintili veya aralıklı olarak uygulanıyor olabilir.

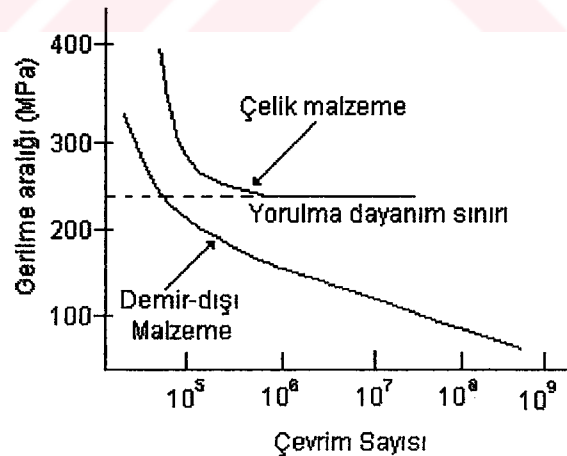
2. Yükün genliği, yani maksimum ya da minimum değerleri önemli olduğu için yük değişimi sinüzoidal olarak kabul edilir (Bargel, Schulze 1980).

Yukarıdaki değerlendirmelerden ve deney sonuçlarından yararlanarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Esin, 1981).

Makine ve taşıtlarda meydana gelen hasarların yaklaşık % 80-95'i yorulma hasarlarıdır.

Yorulma hasarları herhangi bir uyarıcı belirti vermeden ve aniden kırılmanın ortaya çıkmasından dolayı, özellikle tehlikelidir. Yorulmada kırık yüzeyi gevrek kırılma yüzeyine benzer. Makro seviyede ele alındığında genellikle kırık yüzeyi ve şekli yükleme durumuna bağlı olarak değişiklik gösterir.

Bir yorulma kırığı genellikle kırık yüzeyi incelenerek diğer hasar türlerinden kolayca ayrılabilir. Çünkü yorulma kırığı yüzeyinde bir düzgün ve parlak kısım ile kaba bir kısım mevcuttur. Yorulma kırığı ilerledikçe, açılan kesit birbiri ile sürtünerek yüzeyin o bölgesinin parlak bir görünüm almasını sağlar. Daha sonra, küçülen kesit, uygulanan yükü taşıyamayacak bir değere geldiğinde, ani kırılma sonucu kesitin geri kalan kısmı kaba bir görünümde olur.



Şekil 2.1. Demirli ve Demir Dışı Malzemelere Ait Wöhler Diyagramı (Çimenoglu, Kayalı 1991).

Farklı sabit gerilmeler altında, malzemenin kaç çevrimde çatlayacağı veya kırılacağı Wöhler diyagramı ile belirlenir. Wöhler diyagramının düşey ekseninde gerilme genliği (σ_{gn}) yatay ekseninde ise, ortalama gerilme (σ_{og}) sabit kalmak şartıyla, farklı periyodik gerilmeler için tesbit edilen malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N_f) bulunur (Çimenöğlu, Kayalı 1991).

Malzemenin N_f çevrim sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme yorulma dayanımı olarak tanımlanır. Yani yorulma dayanımı; malzemenin sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen, malzemede kopmaya ya da hasara yol açmayan en yüksek gerilme değeridir (Çimenöğlu, Kayalı 1991).

Bu durumda, N_f çevrim sayısı, yorulma ömrü olarak isimlendirilmektedir. Yorulma ömrü; malzemede kırılmaya ya da hasara uğramaya kadar geçen çevrim sayısıdır. Wöhler diyagramında, eğrinin yatay hale geldiği gerilmeye “yorulma sınırı” veya “Yorulma dayanım sınırı (YDS)” denir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir .

Farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağı ya da kırılacağı Wöhler diyagramı ile belirlenir. Demir-çelik gurubu malzemelerde yorulma dayanım sınırı (YDS)

$YDS \cong 1/2 \sigma \cong 2 \cong 0,18$ HB sertlik değeri olup, buna tekabül eden çevrim sayısı $N_f = 10^6 - 10^7$ ’dir.

demir dışı malzemelerde $YDS \cong 1/3 \sigma_f$ olarak kabul edilmektedir. Bu değere tekabül eden çevrim sayısı $N_f = 10^6 \sim 10^8$ dir.

Malzemelerde çatlak bulunması Wöhler eğrisini değiştirmekte ve yorulma dayanım sınırını (YDS) azaltmaktadır. Uzun ömürlü yorulma mekanizması farklıdır. Gerilme akma noktasının altında olduğundan, ömrün tamamı çatlak oluşumu için harcanmaktadır. Ayrıca malzemede genel plastisite söz konusu değildir. Fakat çentik, çizik veya kesit değişiminin sebep olduğu yerel plastisite vardır. Çatlak öncelikle bu gerilme yoğunlaşmasının bulunduğu

bölgelerin birinde oluşur (Şekil 2.1) ve malzeme kopuncaya kadar önce yavaş, sonra hızla ilerler. Bu nedenle, uzun ömürlü yorulmada ani kesit değişimleri veya çizikler malzemenin yorulma özelliklerini oldukça düşürdüğünden çok zararlıdır.

2.1. Yorulma Mekanizması

Yorulma olayının safhaları şunlardır:

1. Çatlağın oluşumu - Uygun bir ısı işlem ile yok edilebilecek bir ilk aşamadır.
2. Kayma - bandı çatlak büyümesi - Oluşan çatlağın ilerlemesi yüksek kayma gerilmeli düzlemlerde derinleşmesi şeklindedir. Buna I. aşama çatlak ilerlemesi de denir.
3. Yüksek çekme gerilmeli düzlemlerde çatlak ilerlemesi : Maksimum çekme gerilmesine dik yöndeki belirgin çatlak ilerlemesinin oluştuğu aşamadır.
4. Nihai, sürekli hasar : Bu aşamada çatlak, sağlam kalan kesit, uygulanan yükü taşımayacak kadar, ilerlediği zaman parça kopar. Yorulma ile ilgili aşağıdaki hususları da dikkate almak gerekir:

Hasarla sonuçlanacak toplam çevrim sayısı, test şartları ve malzemeye bağlıdır.

Çatlak oluşumu, toplam ömrün henüz % 10'u geçmiş iken meydana gelebilir. Çatlak oluşumu da kayma bandının ne kadar derinleştiği ile ilgilidir.

Çekme gerilmesi yüksek ise, keskin çentikli numunelerde olduğu gibi, birinci aşama gözlemlenemeyebilir.

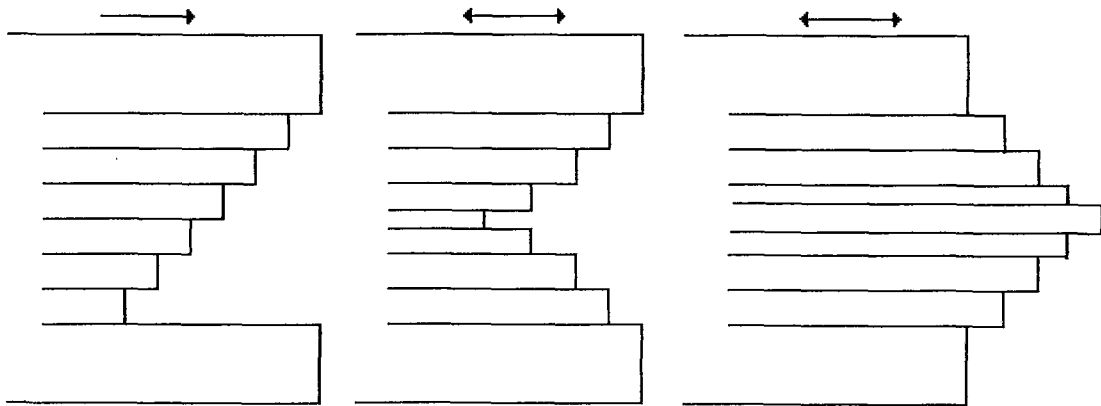
Çatlak, genellikle, bir serbest yüzeyde başlar. Çok nadiren de bir arakesit içeren ara kısımlardan da başlayabilir. Mesela bu arakesit bir karbür-matris arakesiti olabilir.

Yorulma mekanizmaları ile ilgili başlıca teoriler şunlardır :

GOUGH'a göre; metal çevrimsel gerginlik altında aynı yönlü ve tek eksenli gerginlikte olduğu gibi aynı kristalografik yönlerde kayar .

Yalnız tek eksenli kayma, yapının her yerinde görülürken, yorulmada bazı tanelerde kayma hatları görülmez . Kayma hatları genellikle ilk birkaç bin çevrimde ortaya çıkar. Çevrim sayısı arttıkça, kayma bantları da artar. Fakat kayma bantlarının sayısı, çevrim sayısı ile doğru orantılı değildir. Bir çok metalde kayma, bir doygunluk değerine ulaşır. Bu, daha çok ağır kayma bölgelerinde görülür. İşte çatlaklar genellikle başlangıçta kayma bandına paralel olan ağır deformasyon bölgelerinde akışır. Çatlaklar yorulma sınırının altındaki gerilmelerde oluşmuştur. Yani; yorulma esnasında kaymanın oluşması, çatlağın oluşacağı anlamına gelmez. Yorulma testi bir yerde kesilip yüzey elektroparlatma ile parlatıldığı zaman bile yok olmayan inatçı kayma bantları embiryonik yorulma çatlaklarıdır. Bu tür bantlar toplam yorulma ömrünün % 5'inden sonra görülür. Bu bandlara küçük bir çekme gerilmesi uygulanmasıyla bantlar geniş çatlaklara dönüşür.

Wood'un mikrodeformasyon teorisi.



Şekil 2.2. (a)
Statik Deformasyon
Demirli metallerde
her zaman görülür.

(b)
İçe Çekme
Yüzeyde çentik oluşturan
kayma.

(c)
Dışa Çekme
Kayma bandı
ekstrüzyona yol açar

Kayma bantları bir müddet sonra yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, yüzeyde çentikler ve pürüzler oluştururlar. Yorulma buralardaki gerilme yoğunlaşması sonucu başlamaktadır.

Wood'a göre; yorulma çok küçük kayma hareketleri sonucu (1. μm) oluşmaktadır. Halbuki, statik kayma bantları 100 ile 1000 μm boyunda olmalarına rağmen yorulmaya yol açmazlar.

Bu teoriye göre; küçük mikro kayma hareketlerinin sistematik bir şekilde önemli oranda bir deformasyon sertleşmesi meydana getirmeden büyük miktarda toplam deformasyona izin verdiğine inanılmaktadır.

Wood'un teorisi, yorulmanın iki aşamada meydana geldiğini ileri sürmektedir. Buna göre;

1. Aşama :

Birinci aşama çatlağı başlangıçta, inatçı kayma boyunca ilerler. Çok kristalli metallerde çatlak ilerlemesi ikinci çatlağa geçmeden önce, sadece birkaç atom çapı boyutunda ilerler. Birinci aşamada, çatlak ilerleme hızı genellikle çok düşüktür (sadece; birkaç μm /çevrim). İkinci aşamada ise, mikron /çevrim mertebesinde. Birinci aşamaya ait kırık yüzeyi genellikle belirgin özellikte değildir. İkinci aşamaya ait kırık yüzeyinde, her biri, her bir çevrimde oluşan kırığı gösteren çizgili bir görünüm vardır. Bu çizgiler, çekme gerilmesine diktir. Adeta, bu çizgiler sayılarak çevrim sayısı belirlenebilir. Bunlar bazen ancak elektron mikroskobu ile görülebilir.

2. Aşama :

Artık çatlak oluşmuştur. İnklüzyonlar ya da ikinci faz parçacıkları, plastik deformasyon bölgesi içinde boşluklar oluşturarak birbirleri ve çatlak ucu ile birleşirler. Bu nedenle, çatlak ilk duruma göre daha hızlı ilerler. Uzun ömürlü yorulmada; $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{ak}}$, $\sigma_{\text{min}} < \sigma_{\text{ak}}$; ömrün tamamı çatlak oluşumu için harcanır. Malzemede plastisite yoktur. Sadece kesit değişimi, yani süreksiz

kısımda yerel plastik deformasyon vardır. Dolayısıyla çizik, çentik, kesit değişimi çatlak kaynağıdır.

2.2. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler

1. Gerilme yoğunlaşmasının yorulma üzerindeki etkisi,
2. Parça boyutunun etkisi,
3. Yüzeyin etkileri,
 - a. Yüzey pürüzlülüğü,
 - b. Yüzey özelliklerindeki değişiklikler,
 - c. Yüzeydeki artık gerilmeler,
4. Birleşik gerilmenin etkisi,
5. Gerilme genliğinin etkisi,
6. Metalurjik değerlerin etkisi,
 - a. Sıcaklık,
 - b. Frekans (Deney hızı),
 - c. Birim şekil değiştirme genliği,
 - d. Kimyasal etkileme,
 - e. Tane boyutu,

2.2.1. Gerilmenin Etkisi

Parça üzerindeki gerilme artırıcılar yorulma mukavemetini ciddi bir şekilde azaltır. Gerilme artırıcılar, çentikler, delikler, kama yuvaları, dişliler, sıkı geçmeler, geometrik düzensizliklerdir. Ayrıca yüzey pürüzlükleri, poroziteler inklüzyonlar, dekarbürizasyon, aşırı ısınmalar, ikincil (çökelmiş) fazlar gibi metalografik süreksizlikler de gerilme yoğunlaşmasına yol açarak, yorulma ömrünü azaltırlar.

Öte yandan çentiğin, tek yönlü gerilme halinde 3 etkisi vardır :

1. Çentiğin kökünde gerilme yoğunlaşması ortaya çıkar.
2. Çentiğin kökü ile parçanın merkezi arasında bir gerilme gradiyenti meydana gelir.

3. Üç boyutlu bir gerilme hali meydana gelir.

2.2.2. Parça Boyutunun Etkisi

Çapı büyük parçaların yorulma dayanımı, küçük olanlardan daha düşüktür. Çap büyüdükçe, yüzey alanı artar. Dolayısıyla yüzey hatalarının yorulmaya katkısı da artar. Yüzeyde çentik ya da süreksizlik varsa, merkeze oranla, büyük parçalarda, gerilme gradiyenti artar. Bu da yorulma ömrünü azaltır.

Boyut etkisi, bir gerilme gradiyenti bulunduğu için ortaya çıkmaktadır. Kritik bir değerdeki gerilmenin parçanın yüzeyi altında belli bir derinliğe kadar etki etmesi halinde yorulma meydana gelmektedir. Bu da laboratuvar şartlarında elde edilen yorulma dayanımının neden gerçek uygulamalardan çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Küçük parçalarda, gerçek parçalarda oluşan gerilme yoğunlaşması ve gradyentini oluşturmak zordur.

Teoriler, büyük parçaların yorulma dayanımlarının küçük parçalarinkinden daha düşük olduğunu göstermiştir. Yorulma numunesinin boyutu değiştirmenin iki sonucu vardır.

1. Çap büyüdükçe, yüzey alan ya da hacim artar. Yorulma, yüzeyden başlayan bir kusurdur.

2. Çap büyüdükçe, gerilme gradiyenti azalırken, yüksek miktarda gerilen malzeme hacmi artar.

2.2.3. Yüzeyin (Yüzey Pürüzlülüğünün) Etkisi

Yorulma dayanımı üzerinde etkili olan faktörlerden birisi de parçanın yüzey pürüzlülüğünün etkisidir.

Yüzey pürüzlülükleri ve yüzeyde oluşan boşluklar genellikle parçanın üretimden sonraki haddeleme, ekstrüzyon, dövme, talaş kaldırma ve takım

izleri gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. Parçaların adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine maruz kalmasıyla da yüzey süreksizlikleri oluşur.

Çevrimsel deformasyon tek yönlü soğuk plastik deformasyondan daha çok sayıda boşluk oluşturur. Bu boşluklar bazı metallerde başlangıçtaki yumuşamayı izah etmektedir. Söz konusu boşluklar, dışta kalan kayma düzlemi dışına tırmanmalarını ve dolayısıyla, malzemenin kısmen kendini toparlamasını sağlamaktadır. Yorulma dayanımı 20 °C 'den -12 °C 'ye inildikçe artmaktadır. Çünkü boşluk hareketi önemsiz hale gelmektedir.

2.2.4. Malzeme Şartlarının Etkisi

2.2.4.1. Tane Boyutu Etkisi

Genel olarak parçanın tane boyutu azaldıkça yorulma dayanımı artmaktadır. Bu etkinin tane sınırlarının yorulma çatlaklarının ilerlemesini ve hızlanmasını engelleyici rol oynamaktadır.

2.2.4.2. Alaşımlamanın Etkisi

Çekme dayanımı ile yorulma dayanımı doğru orantılı olduğu için yorulmaya maruz kalacak parçalar için çekme dayanımı yüksek malzemeler seçilmelidir. Alaşım elemanlarından miktarı artıp ve segragasyon oranı düştükçe yorulma ömrü artar. Alaşımlamanın en önemli etkisi malzemenin tane boyutunu küçültücü etkisidir.

2.2.4.3. Çalışma Sertleşmesinin Etkisi

Yorulmaya maruz parçalar titreşim yutma ve darbelere dayanıklı ve yüzeyi sert sementasyon çeliklerinden seçilmelidir. Parçanın dış yüzeyi pütürlü ise sürünme konveksiyon ve ısı geçişi doğru orantılıdır. Bu durumdan mutlak surette kaçınılmalıdır.

2.2.4.4. Isıl İşlemin Etkisi

Genel anlamda ısı işlemlerin ve özellikle de yüzey sertleştirme işleminin yorulma ömrünü artırdığı bilinmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin sertliği arttıkça yorulma mukavemetinin de doğrusal olarak arttığını göstermektedir (Kurban, 1993).

Isı ile şekil değişimi arasında doğrudan bir ilişkinin olduğu bilindiğinden yorulmaya çalışacak parçaların yüksek sıcaklıklara maruz kalması önlenmelidir. Çünkü belirli bir sıcaklıktan sonra parçada aniden yorulma çatlaklarının başladığı bilinmektedir.

Çevrim sırasında oluşan maksimum sıcaklık ve plastik şekil değişimi yorulma faktörü, toplam ömrü belirleyen önemli bir büyüklük olmaktadır (Kurban, 1993).

2.3. Yorulma Dayanımı ve Belirlenmesi

Yorulma dayanımı, düzgün veya çentikli parçalarda belirli bir ortalama gerilme için, parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan, sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliğidir. Diğer bir ifade ile yorulma dayanımı, sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilmedir. Taşınabilir en büyük anma gerilmesi genliği ise yapı elemanın yorulma dayanımıdır.

Yorulma dayanımı; malzeme, parçanın büyüklüğü, parçanın biçimi ve parçanın üretim şekline bağlıdır .

Bu sebepten, anma gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı belli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı olarak da tanımlanır .

Yorulma dayanımı Wöhler yöntemi ile bulunur .

Yorulma dayanımını belirlemek için, biçim ve yüzey kalitesi aynı olan deney parçalarının her biri, aralıksız ve farklı şekilde zorlanır. Kırılmanın olmadığı çevrim sayısı böylece tespit edilir.

Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür. Böylece aralıksız yapılan deneylerden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir.

2.3.1. Yorulma Dayanımı Etkileyen Faktörler

Yorulma dayanımına etki eden faktörler şunlardır:

1. Malzemenin üretim şekli ve iç yapısı,
2. Kuvvetin şiddeti,
3. Çevre şartları (ortam),
4. Yüzey durumu,
5. Kuvvet iletimi,
6. Malzemenin şekli,
7. Çekme mukavemeti,
8. Çentik durumu (Gerilim kontrasyon faktörü (kt)),
9. Yorulma testinin tipi (yükleme metodu),
10. Kontrollü test parametreleri,
11. Gerilme oranı,
12. Test frekansı,
13. Test sıcaklığı,

Yorulma dayanımı Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde ortalama gerilme (σ_{or}) veya alt gerilme; (σ_{alt}) sabit tutularak her deney için gerilme genliği (σ_{gn}) seçilir.

İlk gerilme, genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek olarak uygulanır. Daha sonra küçük zorlama uygulanarak yorulma dayanımına ulaşılır.

2.4. Yorulma Tipleri

2.4.1. Isıl Yorulma

Endüstride, çok değişik uygulamalarda, malzemeler çalışma ortamında değişken sıcaklıklarla karşı karşıya gelmektedir ve ısıl gerilmeler oluşmaktadır.

Isıl yorulma, tekrarlı ısınma ve soğuma işleminin, tekrarlanan gerilmeler doğurarak sebep olduğu yorulma türüdür.

Malzemelerin ısıl yorulma davranışı, sürtünme direnci, çekme dayanımı, şekil değiştirme kabiliyeti, elastisite modülü, ısı iletim katsayısı gibi mekanik ve ısıl özelliklere bağlıdır. Diğer taraftan, ısıl yorulma dayanımı, akma veya çekme dayanımı gibi tasarım hesaplarında kullanılabilen temel özellik olmayıp, daha çok çalışma şartlarına bağlı bir özelliktir. Bu nedenle standart bir ısıl yorulma deneyi geliştirilememiştir (Cöcen, Önel 1993).

Çalışma şartları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak meydana gelen ısıl yorulma olayı karşısında malzemelerin davranışlarının tahmin edilmesi için ısıl yorulma kalite faktörleri geliştirilmiştir.

Belirli geometrik ve ısıl şartlarda bir malzemede oluşacak ısıl gerilmeleri, ısı iletimini artırıp; elastite modülü, ısıl genleşme katsayısı ile poisson oranını azaltarak minimum seviyeye indirmek mümkündür.

Isıl yorulmada gerilme-şekil değişikliği eğrisi, ısıtma ve soğutmada eşit plastik şekil değişimini vermektedir.

2.4.2. Korozyon Yorulması

Değişen zorlamalar ile korozyon ortamının ortak etkimesi sonucu ortaya çıkan olaya korozyon yorulması adı verilir. Bu durumda uygun bir yüzey koruması öngörülmemiş ise yorulma dayanımında önemli bir azalma gözlenir; Wöhler eğrilerinde artan çevrim sayısı ile taşınabilir gerilme genlikleri sürekli düşer; Wöhler eğrisinin apsise paralel olmaya başladığı bir sınır çevrim sayısı

belirlenmez. Bu yüzden, korozyon etkisine açık bir deney parçası veya makina elemanı için, korozyon yorulma dayanımından değil, ancak sürekli yorulma dayanımından söz edilebilir.

Korozyon olayı ve yorulma zorlaması değişik zamanlarda birbirini izlediğinde gerilmesiz ön korozyon söz konusudur. Gerilmesiz ön korozyonda oluşan hasarın şiddeti, ön korozyon süresine ve korozyon ortamına bağlıdır. Bitmiş mamüllerin ve parçaların yüzeyleri önlem alınmadan havada veya nemli yerlerde saklanırsa, paslanma ve karıncalanma nedeni ile gerilmesiz ön korozyon oluşabilir (Bargel, Schulze 1980).

Korozyon yorulmasında birim zamandaki çevrim sayısının, yani frekansın da önemli etkisi vardır. Frekans ne kadar düşük olursa çevrim sayısı olarak ifade edilen sürekli korozyon yorulma dayanımı da o kadar düşük olur.

Korozyon yorulmasının yavaşlatılması veya engellenmesi için değişik önlemler mevcut olup, en kolayı yüksek alaşımlı, korozyona karşı dayanıklı çeliklerin kullanılmasıdır. Bununla beraber bu malzemeler, fiyatlarının yüksek olması nedeni ile özel durumlarda seçilebilir. Sıvı korozif ortamlarda kimyasal inhibitörlerin yardımı ile korozyon yorulması geciktirilebilir.

İnhibitör olarak kromat, fosfat, sülfat, nitrat vb. malzemeler kullanılabilir. Bunun dışında yüzeyde oluşturulan basma iç gerilmeleri, yüzey sertleştirme, yüzey kaplama, galvanizleme ve hidrojen giderme ısıt işlemleri de korozyon yorulmasını engellemektedir (Bargel, Schulze 1980).

2.4.3. Fretting

Birbiri üzerinde temas eden iki yüzeyin küçük, periyodik hareketlerinden kaynaklanan bir yorulma hasarı türüdür. Olayın korozyon yorulmasından çok aşınma ile daha sıkı bir ilişkisi vardır. Aşınmadan ayrıldığı nokta, iki yüzeyin bağıl hızının aşınmada karşılaşılandan çok daha düşük olması ve iki yüzey birbiriniden ayrılmadıkları için korozyon ürünlerinin yüzeyden ayrılma ihtimalinin bulunmamasıdır. Fretting yorulması daha ziyade yatak ya da göbek

taşıyan millerde görülmektedir. Yüzeyde oksitlenme ile görünen bir pitting meydana gelmektedir. Yorulma çatlakları genellikle hasarlı bir kısımdan başlar. Frettinge bir dizi mekanik ve kimyasal etki sebep olmaktadır. Metal yüzeyden ya bir taşlama etkisi ya da yüzeye kaynama ve ardından kopma şeklinde uzaklaşır. Kopan parçacıklar oksitlenerek, hasara yardım eden abrasiv tozlar şeklinde etki eder. Bu arada metal yüzeyi de oksitlenir ve oksit tabakası yüzeylerin bağıl hareketi ile kırılır. Fretting için oksitlenme esas değil ise de, oksit tabakaları fretting hasarını kat kat artırır.

Fretting'i önleyici tam tatmin edici bir yöntem yoktur. Eğer yüzeydeki bağıl hareket önlenirse fretting görülmez. Yüzeye dik doğrultudaki kuvvetin artırılması bu olayı durdurabilir. Fakat bu durumda da, bağıl hareket duruncaya kadar, kuvvet artırıldığı için hasar artar. Eğer bağıl hareket azaltılamıyorsa, yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısını azaltmak faydalı olabilir. Bilhassa MoS gibi katı yağlayıcılar, sürtünmeyi azaltıcı en etkili maddelerdir. Yüzeyin aşınma direncini artırmak da bir başka etkili yöntemdir. İki yüzeyi atmosferden tecrit etmek, frettingi azaltır, fakat bunu gerçekleştirmek zordur .

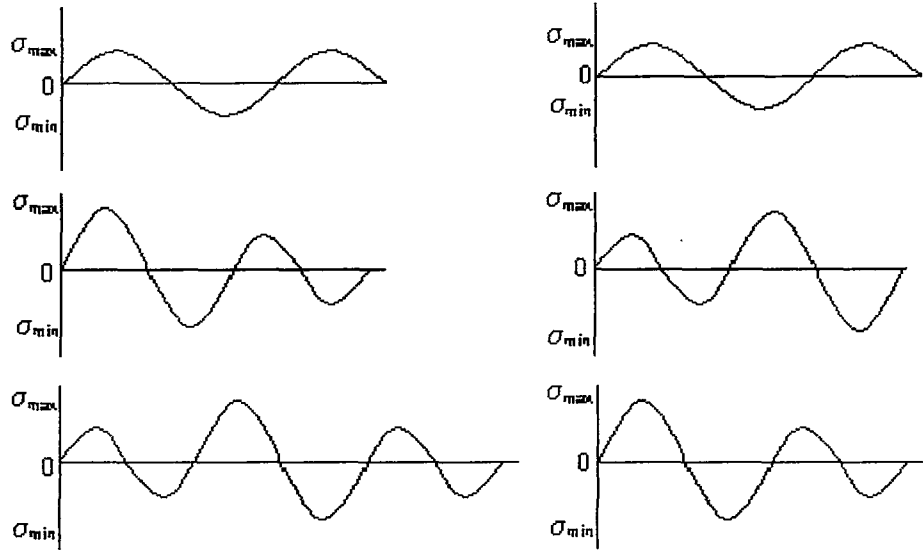
2.5. Malzemelerde Yorulma Ömrünün Tayini

Malzemelerde yorulma ömrü iki şekilde tespit edilmektedir:

1. Gerilme miktarı sabit tutulup, çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki şekil değiştirme miktarı belirlenir.
2. Şekil değiştirme genliği sabit tutularak, çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki gerilme miktarı belirlenir.

Anma gerilmesi: Çekme veya basmada kesite eşit olarak dağıldığı varsayılan gerilmeye; eğme veya burulmada doğrusal olarak değiştiği varsayılan gerilmenin maksimum değerine denir.

Değişken zorlanmada kuvvetin ve momentin max ve min değerleri, sıfır konumuna göre ters ya da aynı işaretli olabilir.



(a) Gerilme Genliği Sabit

(b) Şekil Değiştirme Genliği Sabit

Şekil 2.3. Yorulma Deformasyonunda Malzemelerin Deformasyon Özelliklerinin Tayini

Malzemelerin değişken zorlanmalar altında sertleşmesi çoğunlukla tavanmış, homojen yapıli malzemelerde görülür. Gerilme genliğı veya şekil değıştirme genliğı belli bir çevrim sayısından sonra yaklaşık sabit bir değere ulaşır.

2.5.1. Yorulma Deneyi

Yorulma deneyi iki şekilde yapılmaktadır.

1. Tek kademeli yorulma deneyi : Bu deneyde gerilme, deney boyunca sabit tutulmaktadır.

2. Çok kademeli yorulma deneyi : Bu deneyde de gerilme, deney boyunca değıışmektedir.

Değıışken (Dinamik) yüklere maruz parçaların tasarımında hesaplar şu şekilde yapılmaktadır..

- Şekil, malzeme, boyutlar ve zorlanma verildiğinde kritik kesitlerde yorulma dayanımı kontrolü yapılmaktadır.
- Malzeme ve zorlanma şekli verildiğinde, gerekli güvenliğı sağlayacak boyutlandırma yapılır.

- c. Şekil ve boyutlar verildiğinde, güvenli malzeme ve zorlanma üst sınırı belirlenir.

2.5.2. Yorulma Testi :

Yorulma testi iki şekilde uygulanmaktadır:

1. Çatlak oluşumu (Normal standart yuvarlak numuneler için uygulanan test)
2. Çatlak ilerlemesi (Kompakt çekme numuneleri için uygulanan test).

Gerilme altında, mevcut çatlakların ilerleme hızı kırılma mekaniği metotlarıyla tespit edilir.

Yorulma deney numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gerekmektedir. Talaş kaldırma işlemi keskin uçlu bir torna kalem ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmaması için aşırı deformasyonlardan (büyük pasolardan) kaçınılmalıdır. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına çok dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara işlemi uygulanmalıdır. Numune uzun zaman saklanacaksa parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla yağlanarak korunmaya alınmalıdır (Kayalı, 1980).

Yorulma testi uygulanacak numune iki kelepçe arasına bağlanır. Kelepçelerden biri motor miline bağlanarak numunenin dönmesi sağlanmış olur. Numunenin diğer ucuna bağlı uzun numune kelepçesinin, numunenin bağlı olmadığı ucuna düşey yönde bir kuvvet uygulanarak numunenin kritik kesitine bir moment gelmesi sağlanır. Bu kuvvetin oluşturduğu kesmeden dolayı oluşan kayma gerilmesi, eğilmeden dolayı oluşacak normal gerilmeye göre ihmal edilebilir olduğundan göz önüne alınmamıştır.

Kelepçenin ucuna gelen moment, numuneyi dış bükey yapmaya çalışacaktır. Yani numunenin üst noktası çekmeye, alt noktasında basmaya zorlanır. Numune aynı zamanda döndüğünden numunenin bu noktalarına bir

basma, bir çekme şeklinde sürekli değişen gerilmeler oluşur. Eğer uygulanan gerilme belli bir değerin üstünde ise kritik kesitte çatlaklar oluşacak ve belli bir devirden sonra malzeme kopacaktır.

Kelepçenin ucuna bağladığımız kuvvet iletici çubuk ile uyguladığımız kuvvet ise skala çubuğu üzerinde hareketli bir ağırlık, konumu sabit bir dengeleme ağırlığı ve kuvveti ileten dikey konumlu çubuktan oluşan bir moment kolu sistemi ile yapılmaktadır. Sabit mesnet üzerine yataklanmış skala çubuğunda, mesnetin sonunda dengeleme ağırlığı, sağında ise hareketli ağırlık vardır. Hareketli ağırlık sağa doğru hareket edince, skala çubuğunun sağ tarafına gelen moment artacaktır. Ama bu noktada kuvvet iletici çubuk ile skala çubuğu arasındaki mesnet, moment taşımayan pimli mesnet olduğu için, yalnız kuvvetin etkisi çubuğa ve buradan da kelepçeye etkiyecektir (Çelik,1995).

2.5.3. Yorulma Zorlanması

Büyüklüğü (şiddeti) ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli değişen kuvvet ya da momentlerin (eğilme burulma) etkisine yorulma zorlanması denir.

Yorulma zorlanması sürekli ya da kesintili olarak etki edebilir.

Yükün genliği max ve min değerleri önemli olduğu için, yük değişimi, idealleştirilerek sinüzoidal kabul edilir.

Çevrim Sayısı : Periyot, yük periyodu

$$\text{Çevrim} / \text{Zaman} = Nf / T$$

Frekans : $1 / T$,Yük tekrar sayısı ($T \rightarrow \text{Zaman (sn)}$)

2.5.4. Yorulma ve Zorlanma Dayanımı

Yorulma ve zorlanma dayanımı iki şekilde tespit edilmektedir.

1. Değişken Zorlanma : Değişken zorlanmada kuvvet ve momentin maksimum ve minimum değerleri, sıfır konumuna göre ters ya da aynı işaretli olabilir.

2. Dalgalı Zorlanma : Kuvvet ve momentin sıfır ile bir sınır değeri arasında değişmesiyle ortaya çıkan zorlanmadır.

2.5.5. Yorulma Test Cihazları

Mevcut yorulma deney makinalarının çok değişik tiplerde olması itibariyle, bunların tümünü saymak mümkün değildir. Bunlar içerisinde üzerinde durulan ve deneylerde kullanılan, dönen eğmeli yorulma deney makinesidir.

1. Metallere uygulanan bu deneydeki amaç, malzemenin dinamik kontrole tabi tutularak bu şartlarda ne gibi davranışlar gösterdiğini incelemektir.

2. Dönel eğme yüklemeli, kaldırıcı, bu dört noktada yüklemeli sistemdir.

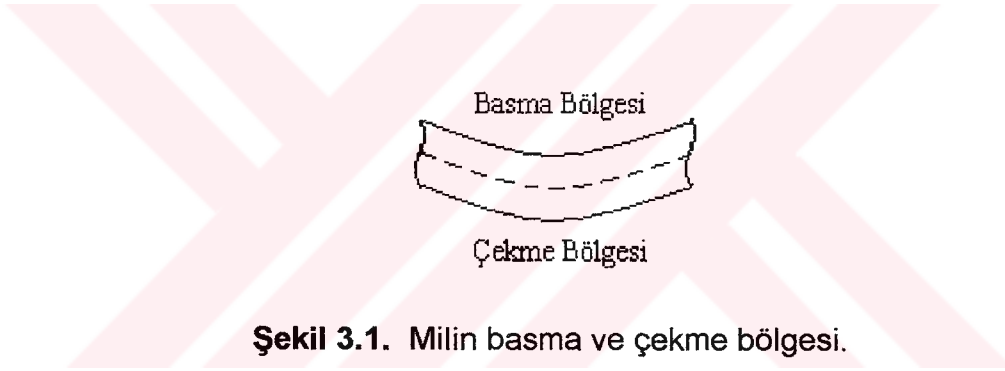
3. Numune üzerine dağıtılmış eğme momentli, ardışık eğme gerilmeli sistemdir. (Oğuz,1989).

Döner eğme gerilmeli yorulma deneyi esnasında numune dönerken, nötr bir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmelerine maruz bırakılır.

3. BÖLÜM

3. KAYNAKLI BAĞLANTILARDA YORULMA

Kaynaklı bağlantılarda yorulma ömrü ana malzemenin yorulma ömründen daha yüksektir. Özellikle dolgu kaynağı yapılmış millerde bu özellik açıkça ortaya çıkmaktadır. Yorulmaya maruz kalan parçalar, dolgu kaynağı yapılmış bağlantılar şeklindedir. Özellikle millerde yorulma şöyle gelişmektedir. Milin yüzeyinin dışı (lifleri) genellikle gerilmesizdir. Oysa milin çeyrek tur dönmesiyle mil yüzeyindeki lifli kısımlar üste gelir ve aniden maksimum eğme sonucunda çekme-basma gerilmesine maruz kalır.



Şekil 3.1. Milin basma ve çekme bölgesi.

Mil tekrar yarım tur dönerse bu defada lifli kısım alta gelir, bunun neticesinde de mil maksimum basma gerilmesine maruz kalır. Bu olay sürekli tekrarlandığından dolayı yorulma hasarları bu şekilde olur.

3.1. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler

1. Kaynak dikiş şekli,
2. Kaynak metodu ve kalitesi,
3. Yön değiştiren yükün büyüklüğü,
4. Ana malzemenin cinsi,
5. Yön değiştirme sayısı,
6. Konstrüksiyonun şekli,

3.2. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Dayanımını Yükseltmek için Alınacak Tedbirler

1. Gerilim yığılmalarının önlenmesi,
2. Kalıntı basma gerilimleri oluşturulması,
3. Kaynak dikişinin, dolgu fazlalığı, yanma oluşu gibi kusurlarını gidermek,
4. Çatlakları tamir etmek,



4. BÖLÜM

4.MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI

4.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Bünyelerinde % 11.5 ila 18 arasında krom bulunan ve her tür soğuma şartında ostenitin martenzite dönüştüğü paslanmaz çelik grubudur. Ostenitik yapıdan itibaren çok yavaş soğumalarda, ferritik bir yapı elde etmek mümkün ise de, bu çelikler daha çok martenzitik yapıda kullanılırlar (Welding Handbook, 1984). AISI 420 serisi martenzitik paslanmaz çelikler, daha çok, valf parçaları, dişliler, miller ve hadde ruloları yapımında kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1993).

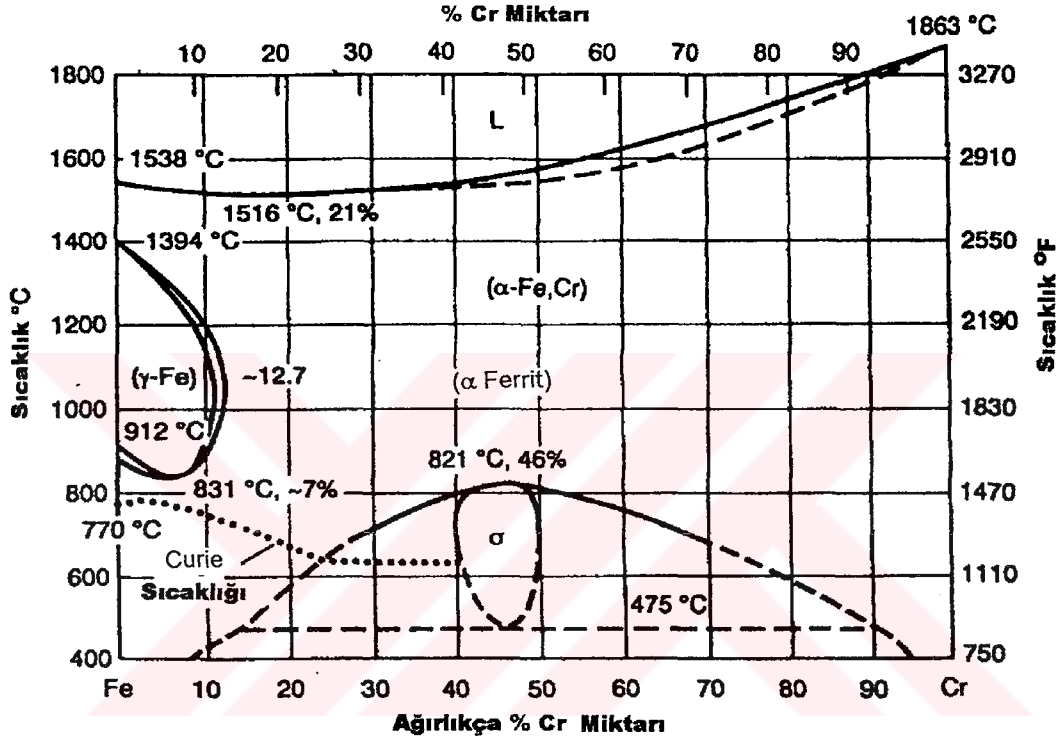
Martenzitik paslanmaz çelikler, orta dereceli korozyon dirençleri, 540 °C' ye kadar ısı dirençleri, mekanik özelliklerinin geliştirilmeye elverişli olması ve nisbeten ucuz olmaları ile bilinirler.

Bu çeliklerde krom ilavesi, ostenit alanını sınırlar, ötektoid bileşimini % 0,35 C' a düşürür, çözünebilir C miktarını % 0,7' ye indirir ve ötektoid nokta sıcaklığını yükseltir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin sertleştirme ve temperlemeye karşı gösterdikleri tepki, sertleştirilebilir karbonlu çeliklerinkine benzerdir. Aralarındaki tek önemli fark, içerdikleri kromun yeterli olması halinde, 820 °C' nin üzerindeki sıcaklıklardan itibaren yapılan soğutmalarda havada sertleşmelerinin gecikmesidir. Maksimum sertliğe 950 °C' nin üzerindeki sıcaklıklardan itibaren yapılan soğutmalarla ulaşılır. Artan krom oranının ostenit bölgesini daraltması sebebiyle % 17 ve üzerinde krom içeren paslanmaz çeliklerin, sertleştirilmeleri mümkün olmaz.

Bu gruptaki çelikler 1000°C civarında tamamen ostenite dönüşürler. Bu sıcaklıktan itibaren yapılacak hızlı soğutmalar, yapıda en yüksek miktarda martenzit oluşmasıyla sonuçlanır. 820°C ila 950°C arasındaki sıcaklıklara kadar ısıtılan çeliklerde ostenite dönüşüm tamamlanamadığı için, bu sıcaklıklardan

itibaren yapılacak soğutmalar sonucu, ferrit ve martenzitten oluşan bir mikroyapı elde edilir (Welding Handbook V4, AWS).

Fe-Cr ikili faz diyagramı, Cr oranı % 12'yi aştığında artık ostenit oluşmayacağını göstermektedir. Bu durum Şekil 4.1' de görülmektedir. Dolayısıyla, %12'den çok krom içerenlerin sertleştirilmesi mümkün değildir (Metals Handbook,1993).

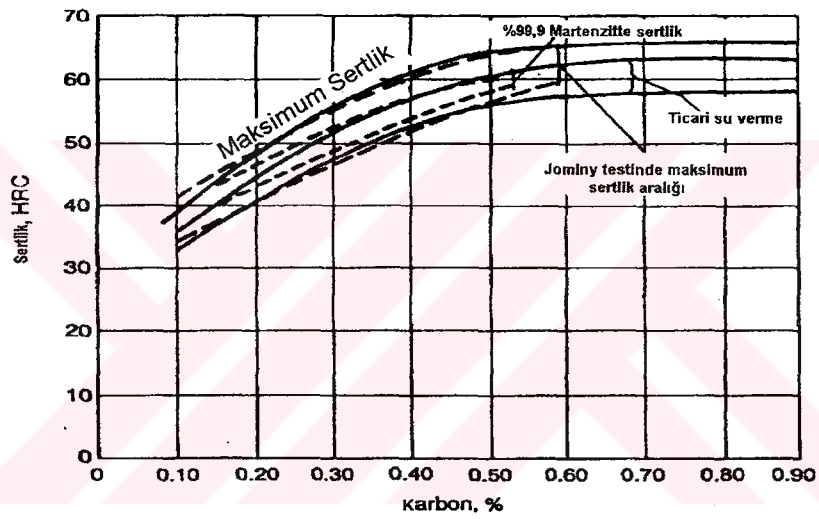


Şekil.4.1 Fe-Cr İkili Faz Diyagramı (Metals Handbook, 1993).

Sertleştirilmiş halde toklukları azdır. Dolayısıyla, istenen tokluğa ulaşmak için, çoğunlukla, temperlenmeleri gerekir. Temperleme ile çok değişik mukavemet değerleri elde etmek de mümkündür.

Bu çeliklerin kaynaklı bağlantılarında, krom miktarı, metalurjik davranışları etkilemektedir. Krom oranı azaldıkça, ostenit alanı genişleyeceğinden, ITAB' de tamamen martenzitik bir yapıya ulaşılırken, krom oranının artması ile, martenzitin yanında bir miktar da ferrit oluşabilir. Martenzitik bir yapıda yumuşak ferritin bulunması, çeliğin sertliğini düşürerek, çatlama riskini azaltır.

Bu çeliklerde sertlik ve martenzitin sertliği % 0,6 C'a kadar, karbon oranına bağlıdır (Welding Handbook, 1984; Metals Handbook, 1993). Karbon oranı % 0,1 olduğunda sertlik 35 HRC iken, % 0,55'e çıktığında 60 HRC'ye ulaşır. Bir başka ifadeyle ITAB'ın sertliğini çeliğin karbon miktarı belirler. Sertlik ve karbon miktarı arasındaki ilişkiyi martenzitik yapı için veren diyagram Şekil 4.2'de görülmektedir. Bu bölgedeki sertlik, belli bir oranda, kaynağın uygulanış şekli ile de kontrol edilebilir. Çok dik ısı gradiyenti, düşük ısı iletimi ve faz dönüşümü esnasında meydana gelen hacim değişiklikleri ile birleşince, çatlamaya yol açan yüksek iç gerilmeler oluşturmaktadır. Bunu önlemek için kaynak esnasında önlem almak gerekir.



Şekil 4.2. Tamamen Sertleşmiş Martenzitik Paslanmaz Çeliklerde, Karbon Miktarı İle Sertlik Arasındaki İlişki (Metals Handbook, 1993).

4.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Martenzitik paslanmaz çelikler, tavllanmış, gerginlik giderilmiş, sertleştirilmiş ya da temperlenmiş halde kaynak edilebilirler; yalnız, bunların kaynak kabiliyetleri zayıftır ve % 0,25'ten daha fazla karbon içerenlerin kaynaklanması tavsiye edilmez. Bu çelikler havada sertleşebilme özelliğine

sahiptirler. Bu nedenle ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) oluşan sert ve kırılgan martenzitten ötürü çatlama eğilimleri yüksektir. Düşük C'lu olanlarda çatlama riski daha azdır. Genel olarak % 12-14 Cr'lu paslanmaz martenzitik çeliklerin sertleşebilme kabiliyeti, bileşimlerindeki karbon miktarına paralel olarak artar. %0,05-0,15 karbon aralığında, karbon miktarındaki her % 0,01'lik artış, malzeme sertliğini 10-12 Brinell artırır (Welding Handbook, 1984; Eryürek, 1991).

Isıl işlemin ITAB'nin sertleşmesi yani kaynak yeteneği üzerindeki etkisi azdır. ITAB'nin sertliği, esas itibariyle, çeliğin karbon miktarına bağlıdır ve ısı işlemlerle, bir dereceye kadar, kontrol edilebilir. Bu çeliklerde, Cr oranı ne olursa olsun, alaşım elemanları ferrit oluşumunu geciktirir ve martenzit başlama sıcaklığını (M_s) düşürür. Bazı istisnai hallerde, oda sıcaklığında bile bir miktar ostenit kalır. Bu nedenle, ana metalin ısı işlem şartları ne olursa olsun, kaynaktan hemen sonra hem ITAB hem de dikişin ITAB'ye komşu kısmında martenzit oluşur. Karbon oranı yüksek ise, oluşan martenzit hem gevrek hem de serttir. Dolayısıyla, martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, çatlama önleyecek tedbirlerin alınması gerekir. Bu çeliklerin kaynak uygulamaları, genellikle rulolar üzerinde yapılmıştır (Metals Handbook, 1993).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında izlenecek metot: yüksek bir sıcaklıkta ön tavlama yapmak, pasolararası sıcaklığı yüksek tutmak, yüksek ısı girişi ile kaynak yapmak ve kaynak sonrası temperleme ve tavlama ile çatlama manî olmak şeklinde sıralanabilir.

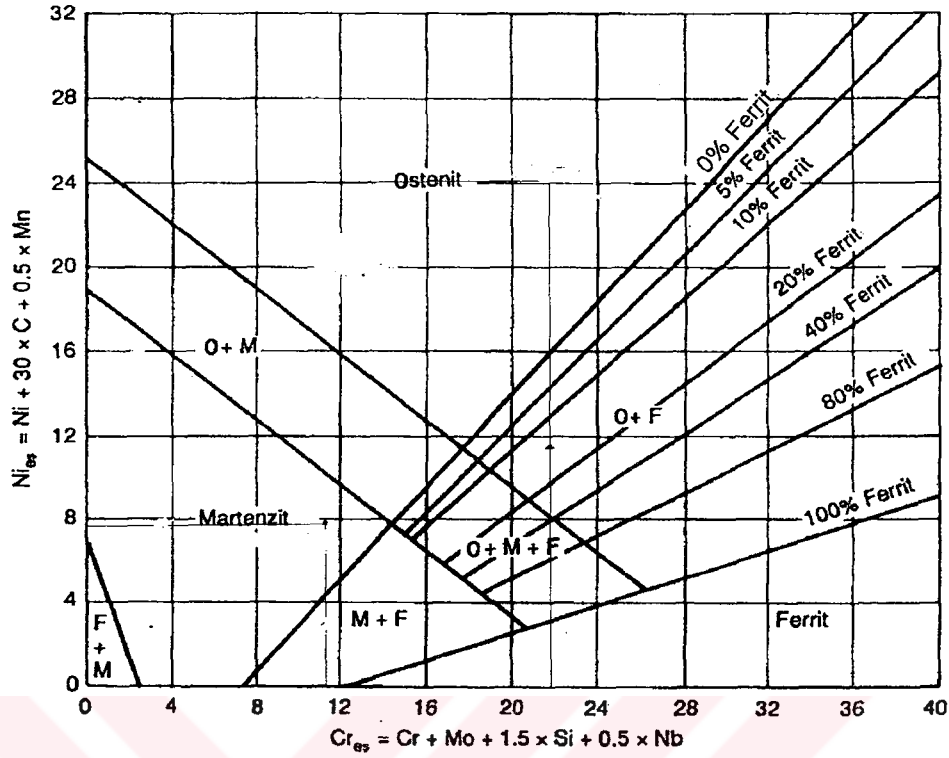
Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında iş parçası dikkatle hazırlanmalı ve yerleştirilmelidir. Her kalınlıktaki elektrod için aşırı elektrod salınımından kaçınılmalıdır. Maksimum salınım elektrod çekirdek çapının dört katından büyük olmamalıdır. Kaynak metalinin yığılması için genellikle salınımsız dikiş tekniği tavsiye edilmektedir. Pasolar arasında curuf kaldırma sırasında dikkatli davranılmalıdır. Bunun için sadece paslanmaz çelik takımlar ve fırçalar kullanılmalıdır (Eryürek, 1991).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, elektrod olarak ostenitik ya da dupleks ferritik-ostenitik elektrodlar kullanılmalıdır. Sıcak yırtılmaların

önüne geçmek için dolgu malzemesi olarak ferritik-ostenitik elektrodların kullanılması gerekir. Dikiş, ostenit ve az miktar da ferrit içerdiği taktirde, dikişin sünekliği ITAB' den çok yüksek olacağından, ITAB' de soğuk çatlama riski artar. Bunu önlemek için AISI 420 serisi martenzitik paslanmaz çeliklere 350°C civarında bir ön tavlama uygulamak ve kaynaktan sonra yavaş soğutmak gerekir (Metals Handbook, 1993). Bu çeliklerde dikişin kaynak sonrası mikro yapısını tahmin için Schaeffler diyagramından (Şekil 4.3) yararlanılabilir. Bu amaçla, hem ana metal hem de elektrod için nikel ve krom eşdeğerleri belirlenir. Diyagram üzerinde bu eşdeğerlerin kesişim noktalarını birleştiren doğru, dikişte oluşabilecek muhtemel yapıları gösterir. Eğer çelikteki azot miktarı belirlenmişse, aynı amaçla, De Long ya da WRC diyagramları da kullanılabilir (Metals Handbook, 1993 ; Tülbentçi, 1995).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, ısının tesiri altındaki bölgede 4 kısım meydana gelir. Bu kısımlarda oluşan yapılar, Fe-Cr denge diyagramı (Şekil 4.1) ile irtibatlandırılabilir. Literatürde bu kısımlar aşağıdaki gibi verilmektedir (Lippold 1984).

1. Kısım: Dikişte ergime hattına komşu olan ve temperlenmemiş martenzit ile ferritten oluşan iki fazlı bölge.
2. Kısım: ITAB' ın tamamıyla temperlenmemiş martenzitten oluşan, kaynak esnasında ostenit bölgesinin üst kısımlarına kadar ısınan kısmıdır. Ana metaldeki karbürler tamamen çözündüğü için, ostenit bütünüyle temperlenmemiş martenzite dönüşmüştür.
3. Kısım: Kaynak esnasında ostenit bölgesinin aşağı kısımlarına kadar ısınan kısmıdır. Bu nedenle, bu bölgede, temperlenmemiş martenzit yanında karbürler de mevcuttur. Yani, çikılan sıcaklık nedeniyle, karbürler tam çözünmemiş ve martenzit dönüşümünden önceki ostenit taneleri 2. Kısımdaki kadar irileşmemiştir.
4. Kısım: Temperlenmemiş martenzit ve değişmemiş karbürlerden oluşur. Bu kısımda yapı, ana metalinkine yakındır.



Şekil 4. 3. Schaeffler Diyagramı

4.3. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Alınacak Tedbirler

Elektrod olarak, genellikle, ostenitik paslanmaz çelik elektrodlar kullanılır. Bu durumda, sünekliliği nispeten yüksek, akma mukavemeti düşük ve çekmeden kaynaklanan iç gerilmeleri daha az olan bir kaynak dikişi elde edileceğinden, kaynak sonrası gerilme giderme tavlamasına duyulan ihtiyaç da ortadan kalkar.

Martenzitik paslanmaz çeliklerde kaynak sonrasında meydana gelebilecek çatlamları önlemek için alınacak tedbirlerin başında ön tavlama gelir. Ostenitin martenzite dönüşüm sıcaklığı ön tavlama sıcaklığının belirlenmesinde ana faktördür. Martenzit başlama sıcaklığı olarak adlandırılan bu sıcaklık, Kaynak Enstitüsünün geliştirdiği bir denklem yardımıyla hesaplanabilir (Metals Handbook vol 6, 1993). Bu denklem, çeliğin içerdiği alaşım elemanlarının ostenit alanını genişletmeleri dikkate alınarak:

$$M_s = 540 - (497 \times \%C + 6,3 \times \%Mn + 36,3 \times \%Ni + 10,8 \times \%Cr + 46,6 \times \%Mo) ^\circ C$$
 şeklinde verilmektedir. Burada, M_s , martenzit başlama sıcaklığıdır.

Ön tavlama sıcaklığının belirlenmesinde önem arzeden diğer faktörler de parçanın kalınlığı, zorlanma derecesi ve çentik etkisidir. Parça kalınlığı arttıkça, daha büyük gerilmeler meydana geleceği için ön tavlama sıcaklığının üst sınırdan seçilmesi gerekir. Tecrübeler, karbon oranı % 0,1, kalınlığı 3 mm ve daha az olan parçalarda ön tavlama gerektirmediğini göstermiştir.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin ön tavlama sıcaklıkları 200 ila 400°C arasında değişir. Bu ön tavlama parçada herhangi bir sertlik azalması meydana getirmez; sadece oluşan ısı gerilmeleri azalttığından çatlama ihtimalini azaltır.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, alınacak tedbirlerden birisi de son tavlama yapmaktır. Bu tavlamanın amacı, oluşan martenziti temperleyerek, tokluğu artırmak, sertliği ve kaynak sonrası oluşan gerilmeleri azaltmaktır. Bu çeliklerde son tavlama iki şekilde yapılır:

- a. Temperleme: Kaynaklı bağlantı, ostenit başlangıç sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklık, takriben, 650 ila 750°C arasındadır. Parça bu sıcaklıkta her 2,5 cm kaynak kalınlığı için yaklaşık olarak 1 saat süre ile bu sıcaklıklarda bekletilir.
- b. Düşük sıcaklıkta tavlama: Bu işlem, 300 ila 400° arasındaki sıcaklıklarda yapılır. Bu şekilde, hidrojen gevreklesmesinin önüne geçilerek, çatlama tehlikesi ortadan kaldırılmış olur. 450 ila 500° arasındaki sıcaklıklardan kaçınılması gerekir. Çünkü, dikişin tokluğunu azaltmaktadır.

Martenzitik paslanmaz çeliklerde karbon oranına bağlı olarak uygulanması gereken ısı işlemleri şunlardır:

1. Karbon oranı % 0,1' in altında ise, ısı işlemi gerekmez.
2. Karbon oranı % 0,1 ila % 0,2 arasında ise, parça 260°C' de ön tavlama tabi tutulur; kaynak sonrası 65°C' ye kadar yavaş soğutulur ve sonra temperlenir.
3. Karbon oranı % 0,2 ila % 0,5 arasında ise, parça 260°C' de ön tavlama tabi tutulur; kaynak sonrası 65°C' ye kadar yavaş soğutulur; ostenitleme yapılır ve sonra temperlenir.

4. Karbon oranı % 0,5' den yüksek ise, parça 260°C' de ön tavlamaaya tabi tutulur;kaynak esnasında yüksek enerji girişı sağlanır; kaynak sonrası 260°C' ye kadar yavaşı soğutulur ostenitlenir ve sonra temperlenir.



5. BÖLÜM

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Çalışmanın Amacı

Pratikte, çok küçük kaynak dikişleri açmak şartıyla yada çok düşük C'lu olanları hariç martenzitik paslanmaz çelikler kaynak edildikten sonra, herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmaksızın kullanılmamaktadır. Çünkü çok gevrek bir kaynak bölgesi oluşmakta ve bu bölge dikişin ITAB'ye komşu kısımlarını da kapamaktadır. Ne var ki: tamir gerektiren hallerde kaynak kaçınılmaz olmaktadır.

Literatürde, bu tip çeliklere dolgu kaynağı uygulanmasından kaçınılması tavsiye edilmektedir. Ancak, artık gerilmelerin çok düşük olacağı lazer, elektron ışın ve TIG kaynağı uygulanarak küçük parçaların emniyetle kaynak edilebileceği belirtilmektedir (Metals Handbook, 1993).

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak, sözkonusu çeliklerden yapılmış millerin acil tamir edilmeleri halinde yeniden kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, ısıtım işlemleri, ön tavlama ve kaynak sonrası temperlenmiş haldeki dolgu kaynaklarının yorulma davranışlarının araştırılmasına karar verilmiştir. Yorulmanın daha çok dolgu kaynağı uygulanan bölgede meydana geleceği düşünüldüğünden, elektrod olarak ostenitik yapıda bir elektrod seçilmiştir. ITAB'da kaynak sonrası oluşabilecek olumsuz yapı değişikliklerine mani olmak içinde literatürde önerilen iki farklı ısıtım işlemi uygulanmıştır.

Bu tip millerin kaynaklı bağlantılarının yorulma davranışı üzerinde fazla bir çalışma yoktur. Bu nedenle bu çalışma bu alandaki bir boşluğu dolduracaktır. Ayrıca kaynaklı bağlantıların yorulma davranışları üzerinde yapılan diğer yorulma çalışmalarından farklı olarak, kompakt çekme testi yerine, döner eğmeli yorulma testi uygulanmış, böylece millerin çalışma şekline benzeştirilmeye çalışılmıştır.

5.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

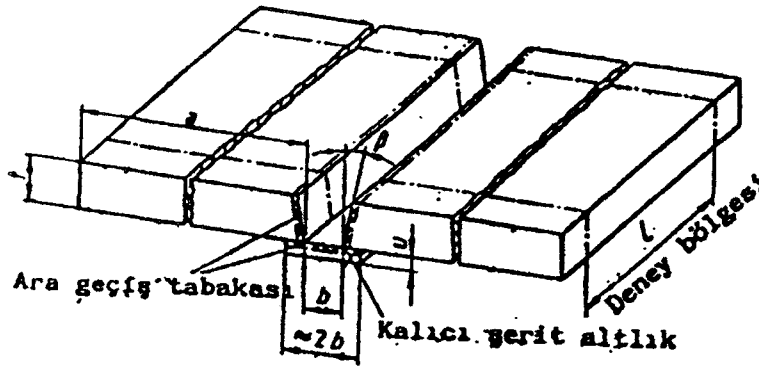
5.2.1. Ana Metal

Deneylerde, bileşimi Tablo 5.1'de verilen martenzitik paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu maksatla dökülen malzemeler, döküm sorası şahmardanda dövülmüş ve işlenerek, DIN 32523-1'e uygun kaynak numune boyutlarına getirilmiştir. DIN 32525-1, ilave malzemelerin kaynak metali numuneleri ile test edilmesi hakkındadır. Söz konusu standart, dolgu kaynağı uygulanan millerde, yorulmanın daha çok, dolgu yapılan bölgede meydana geleceği düşünüldüğü için, ilave malzemenin etkisinin büyük olacağı dikkate alınarak seçilmiştir. DIN 32525-1'e göre hazırlanan kaynak numunesinin şekli ve boyutları şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

Alaşım Elemanı	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Fe
% Miktarı	0,204	0,220	0,023	0,02	0,403	1,268	11,15	0,086	0,017	86,61

Kaynak metalinin elde edileceği numuneler, Tablo 5.2.'de DIN 32525-1'e göre verilen 3 no'lu biçime uygun boyutlarda frezede işlenmiş, kaynak ağız oksit ve diğer yabancı maddelerden temizlenmiştir. Kaynak esnasında, kalıcı şerit altlık olarak bakır kullanılmıştır. Altlık her türlü, oksit, yağ ve kirden arındırılmıştır.



Şekil 5.1. DIN 32525-1'e Göre Numune Şekli ve Boyutları

Tablo 5.2. Ana Metal ve Kaynak Bölgesi Ölçüleri

Biçim	t	a	b	u	β Derece	l
1	12	>80	>12	>6	10	>150
2	16	>90	>14	>6	10	>150
3	20	>100	>16	>6	10	>150
4	25	>150	>20	>6	10	>150
5	30	>200	>25	>6	10	>150

5.2.2. Kullanılan Kaynak Makinası

Kullanılan kaynak makinasının ve elektrodun özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Kullanılan Kaynak Makinası ve Elektrodun Özellikleri

Akım Üretici	UMS 250 DC tipi su soğutmalı plazma kesme ve aynı zamanda redresöre çevrilebilir bir kaynak makinası kullanılmıştır.
Akım Şiddeti	170 Amper sabit.
Kaynak Pozisyonu	Yatay oluk.
Paso Sayısı	13.
Dikiş Şekli	Düz, yatay oluk.
Elektrodun Cinsi	Ostenitik paslanmaz çelik elektrod.
Elektrodun Çapı	ϕ 3,25 sabit
Kutup	Değiştirilebilir (+, -) Kutup, çalışılan kutup +.

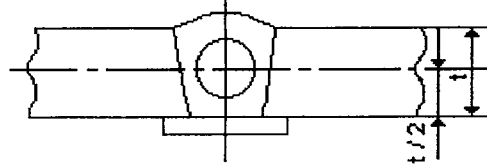
Kullanılan elektrodun kimyasal bileşimi Tablo 5.4'de verilmiştir. Hidrojen gevrekleşmesinin önüne geçmek için, elektrodlar kaynak öncesi 300°C sıcaklıkta 2 saat süreyle kurutulmuş ve fırından çıkarıldıktan sonra hemen kullanılmıştır.

Tablo 5.4. Elektrodun Kimyasal Bileşimi

Alaşım Elemanı	C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
Yüzdesi	0.10	2.0	0.4	25	20	Kalanı

5.2.3. Kaynak Metalinin Çıkarılması

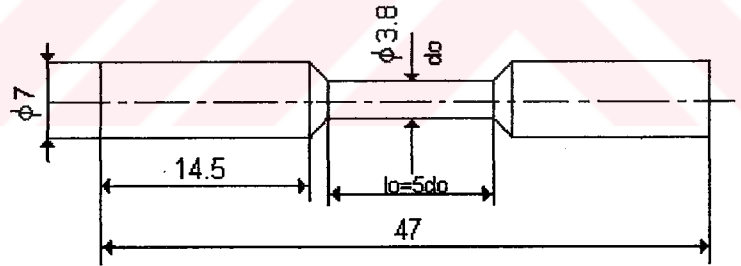
Kaynak işlemi tamamlanan parçalardan deney numunelerinin çıkarılması için kaynak metali Şekil 5.1'de belirtilen yerlerden 10x10 mm'lik şeritler halinde hidrolik testerede kesilip, vargelle standart boyutlara getirildi. Daha sonra, kopye tornada yorulma ve çekme numuneleri Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'de belirtilen ölçülerde işlendi. Numune yüzeyleri taşlanarak parlatıldı.



Şekil 5.2. Çekme ve Yorulma Deney Numunelerinin Çıkarılışı

5.3. Çekme Deneyi

Çekme deneyi oda sıcaklığında yapılmıştır. Kaynaklı numunenin çekme numunesi test edilerek akma ve çekme noktaları tespit edilmiştir. % uzama (5xd) üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4.'de, çekme numunesi ölçüleri Şekil 5.3.'de verilmiştir.



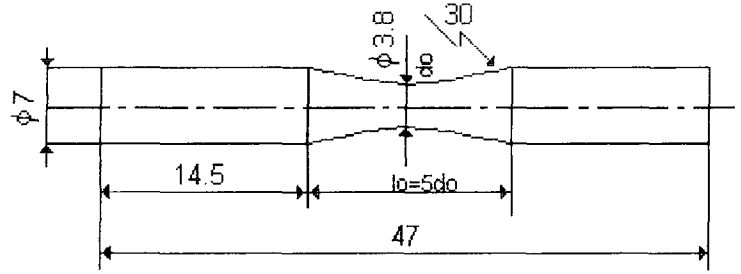
Şekil 5.3. Çekme Numunesi Ölçüleri

Tablo 5.5. Çekme Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Numune	Akma Noktası N / mm^2	Çekme Noktası N / mm^2	Yüzde Uzama (%) 5xd
Isıl İşlemsiz	490	630	12.5
350°C de Ön Tavlama Yapılmış	490	660	18.75
700°C de Temperlenmiş	530	450	25

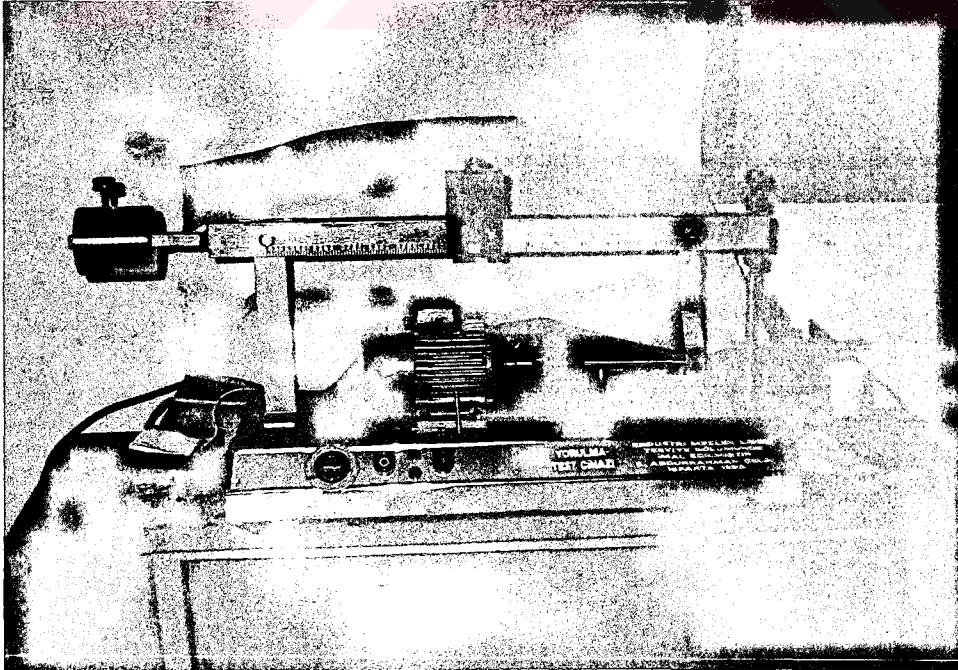
5.4. Yorulma Deneyi

Uygulanan yorulma deneylerinde ısıtıl işlem görmüş ve görmemiş numunelere çevresel eğme, cihazlarda yüklemeler, akma noktasının yarısından başlanmıştır. Deney cihazının resmi Şekil 5.5.'de verilmiştir. Önce yorulma sınırı için 3×10 sınırı esas alınmış, sonraki işlemlerde Wöhler eğrisinin diğer noktaları belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Yorulma Deney Numunesi Ölçüleri

Deneylerde uluslararası kaynak enstitüsünün raporları doğrultusunda hareket edilmiştir. Yorulma dayanım sınırında numunenin denemesi yapılmıştır. Wöhler eğrisinin diğer noktaları belirlenirken iki noktanın kırılmasına önem gösterilmiştir. Deneylerde alınan sonuçların ortalaması Wöhler eğrisinde gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Yorulma Makinasının Resmi

5.5. Metalografik İncelemeler

Kaynak bölgesinden 9 eşit parçaya bölünerek çıkarılan numunelerden herbir işlem için biri, 80 ila 1200 meşlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 3 mm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler %50 saf su + %50 HCl çözeltisinde, daldırma suretiyle, 6 voltta dikiş (-) kutupta, ITAB ve ana metal (+) kutupta 30 saniye ile elektrolitik olarak dağlanıp, metalografik incelemeye hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan numuneler optik mikroskopta incelenmiştir. Metalografik inceleme sonuçları 6. bölümde verilmiştir.

5.6. Sertlik Ölçümleri

Hem parlatılmış kaynaklı numunelerde hem de orijinal numunede 5 kg'lık yük ile Vickers sertlik ölçeği ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik değerleri kaynaklı bağlantılarda dikişte, kök pasodan kapak pasoya doğru, kaynak bölgesinde ise dikiş ortasından ana metale doğru ölçülmüştür. Sertlik ölçüm sonuçları da 6. bölümde iç yapı analizleri ile birlikte verilmiştir.

6. BÖLÜM

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Isıl işlemsiz, ön tavllanmış ve kaynak sonrası temperlenmiş numunelere ait çekme testi sonuçları Tablo 6.1' de verilmiştir.

Tablo 6.1. Kaynak Yapılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri

Numune	Akma Noktası Mpa	Çekme Gerilmesi MPa	Yüzde Uzama (%) 5xd
Isıl İşlemsiz	490	630	12,5
350°C'de Ön Tavllanmış	490	660	18,75
700°C'de Temperlenmiş	530	450	25

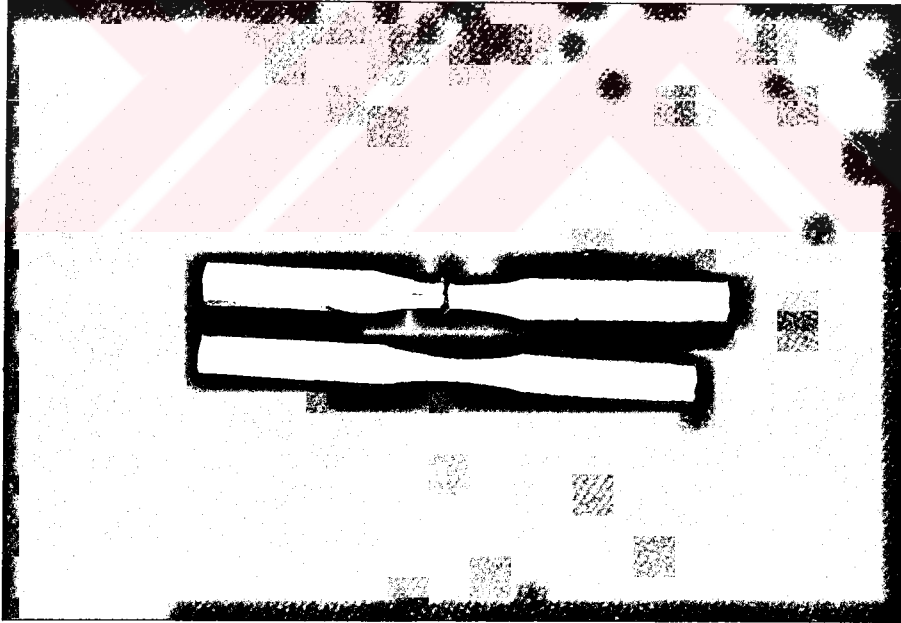
Tablo 6.1' den , temperlenmiş numunede süneklik artışı, akma gerilmesinde ve uzamadaki artıştan açıkça görülmektedir.

6.2. Metalografik Muayene Sonuçları

Şekil 6.1'de metalografik muayene için hazırlanmış, temperli numunenin makroskobik fotoğrafı verilmiştir. Şekil 6.2'de ise yorulma numunesi ve yorulma sonrası kırılmış numunenin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 6.1 Metalografik Muayene İçin Hazırlanmış, Temperli Numunenin Makroskobik Fotoğrafı.

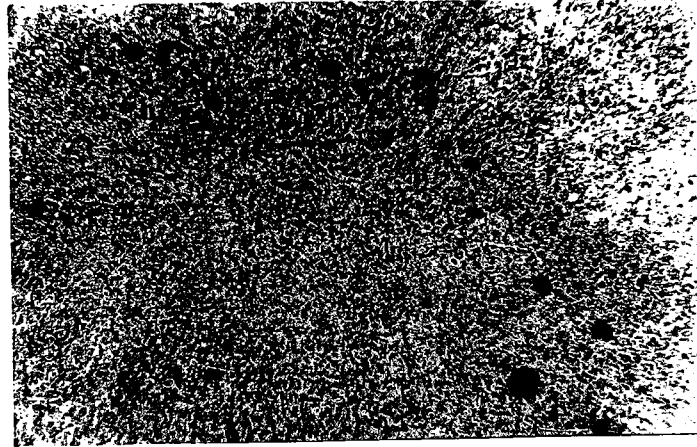


Şekil 6.2. Yorulma Numunesi ve Yorulma Sonrası Kırılmış Numunenin Fotoğrafları.

Şekil 6.3. çalışmaya esas teşkil eden orijinal hasarlı milin iç yapısını, Şekil 6.4 ise dökümden sonra dövülmüş numunenin mikro yapısını göstermektedir.



Şekil 6.3. Orijinal Hasarlı Milin İç Yapısı. X400

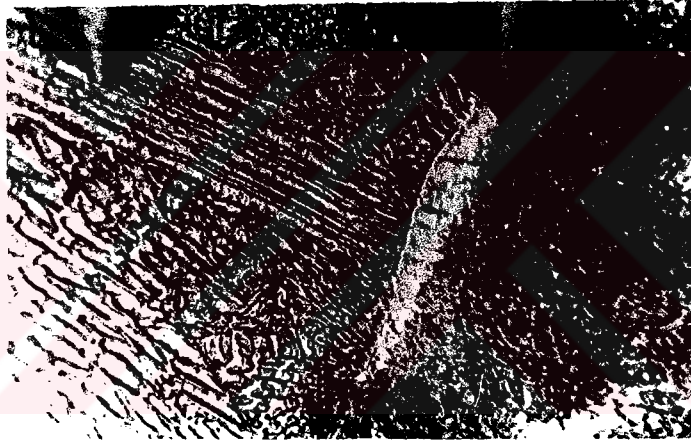


Şekil 6.4. Dökümden Sonra Dövülmüş Numunenin Mikro Yapısı. x400

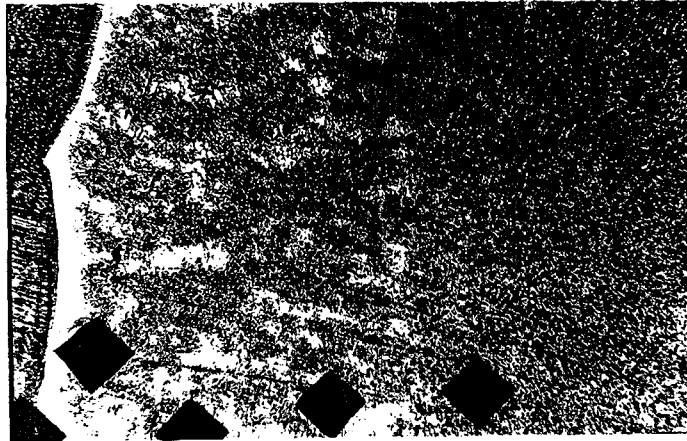
Şekil 6.5. ısıt işlem uygulanmamış numunenin kaynak bölgesinin iç yapı fotoğraflarını göstermektedir.



(a)



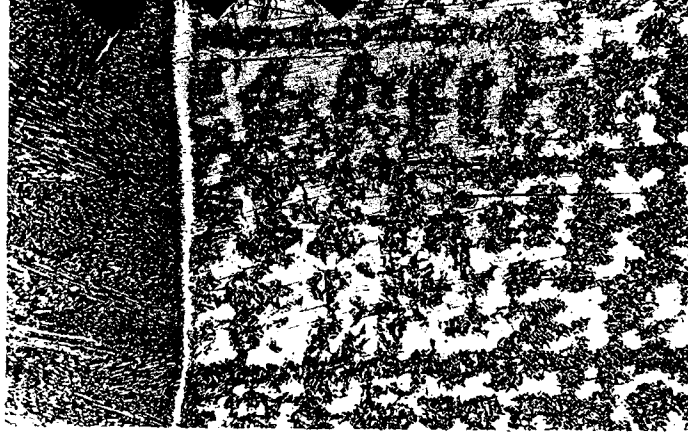
(b)



(c)

Şekil 6.5. Isıl İşlem Görmemiş Numunede a. Dikiş+ITAB, (x100), b. Dikiş Kenarı, (x400) ve c. ITAB+Ana Metal, (x100).

Şekil 6.6. ön tavllanmış numunenin kaynak bölgesinin iç yapı fotoğraflarını göstermektedir.



(a)



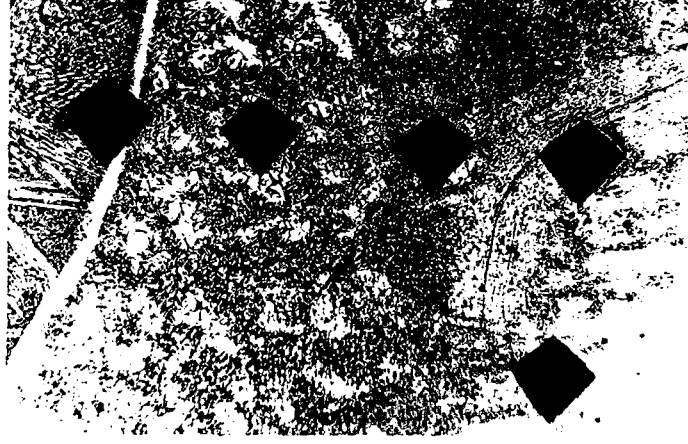
(b)



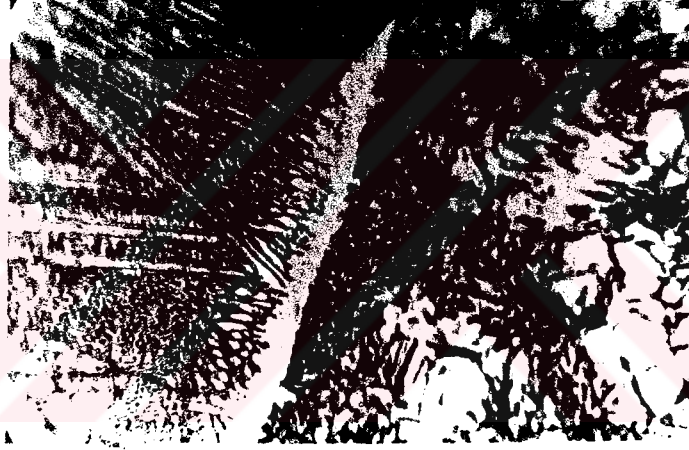
(c)

Şekil 6.6. Ön Tavllanmış Numunede a. Dikiş+ITAB, (x100), b. Dikiş Kenarı, (x400) ve c. ITAB+Ana Metal, (x100).

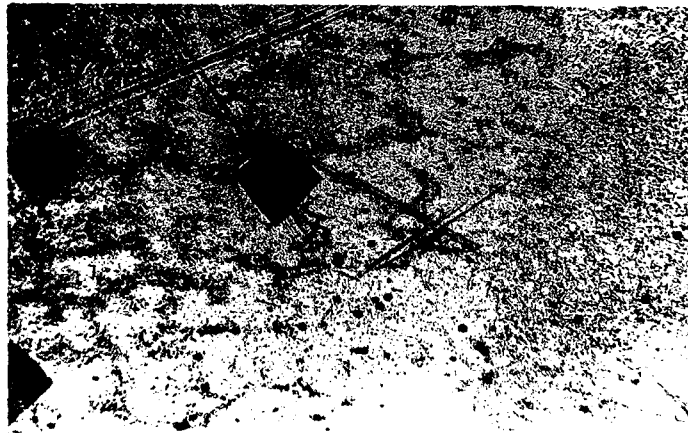
Şekil 6.7. temperlenmiş numunenin kaynak bölgesinin iç yapı fotoğraflarını göstermektedir.



(a)



(b)

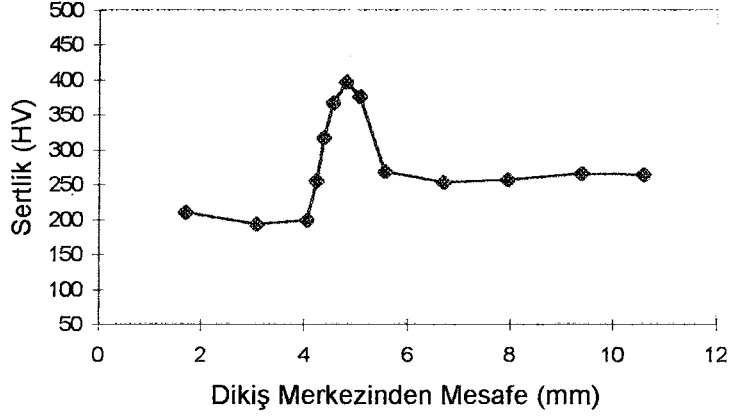


(c)

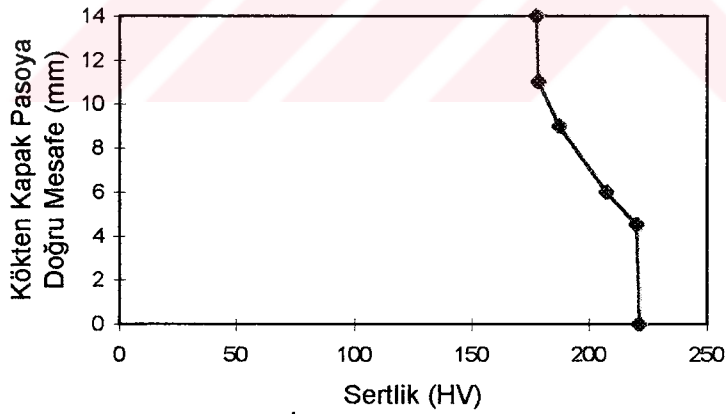
Şekil 6.7. Temperlenmiş Numunede a. Dikiş+ITAB, (x100), b. Dikiş Kenarı, (x400) ve c. ITAB+Ana Metal, (x100).

6.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları

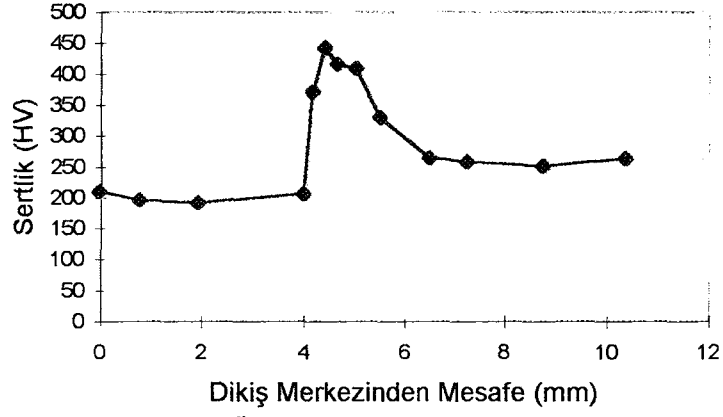
Dikiş ortasından itibaren kaynak bölgesine ait sertlik değerleri, Şekil 6.8 ile 6.13'de verilmiştir.



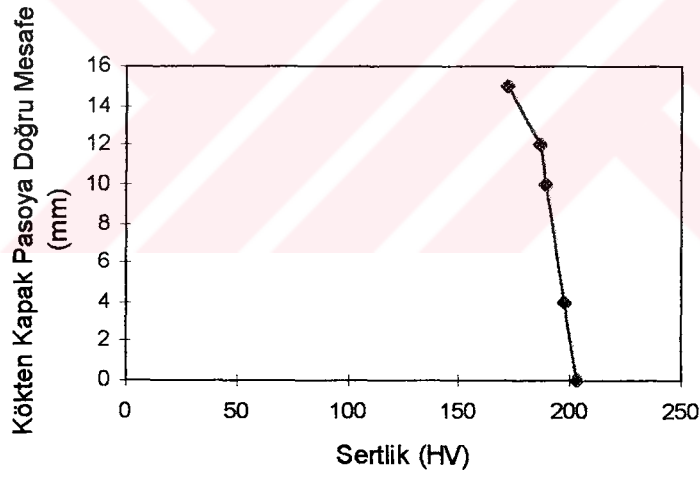
Şekil 6.8. Isıl İşlemsiz Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı



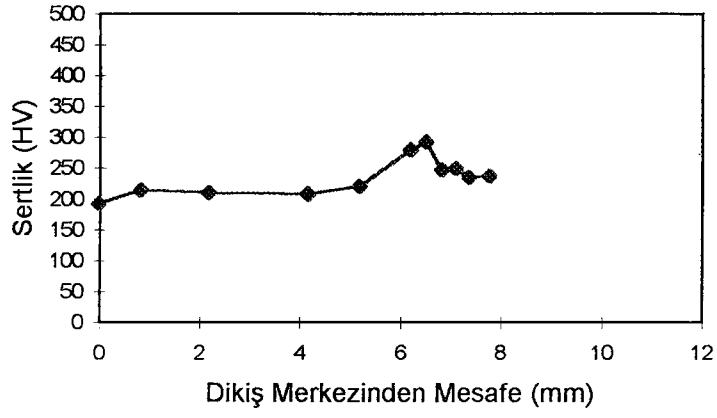
Şekil 6.9. Isıl İşlemsiz Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı



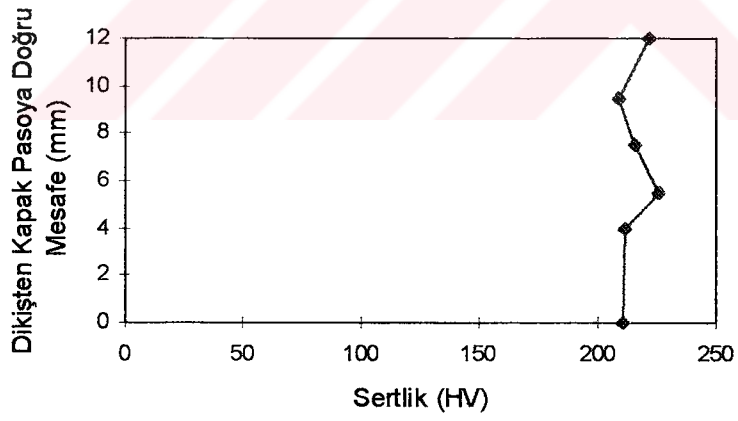
Şekil 6.10. Ön Tavlı Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı



Şekil 6.11. Öntavlı Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı



Şekil 6.12. Temperlenmiş Numunede Dikiş ve ITAB'de Sertlik Dağılımı



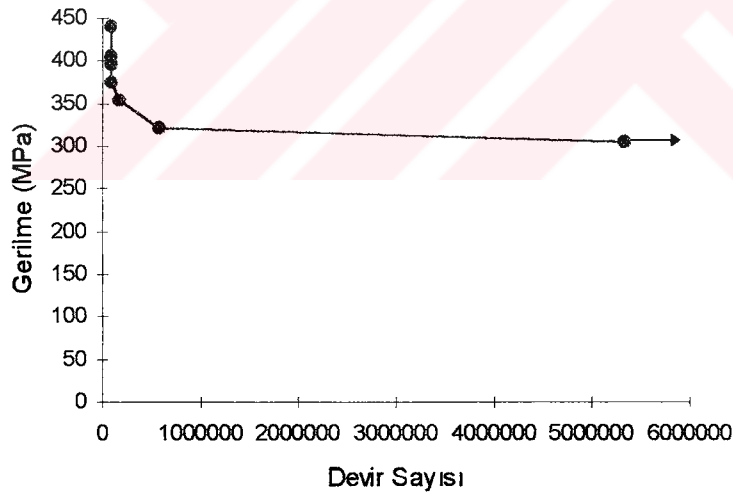
Şekil 6.13. Temperli Numunede Dikişte Sertlik Dağılımı

6.4. Yorulma Testi Sonuçları

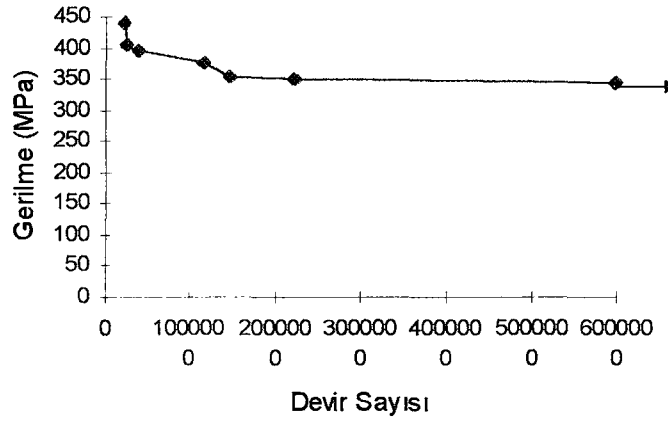
Yorulma testi sonuçları Tablo 6.2'de sayısal olarak, Şekil 6.14 ila Şekil 6.16'da ise grafik olarak verilmiştir.

Tablo 6.2. Yorulma Testi Sonuçları

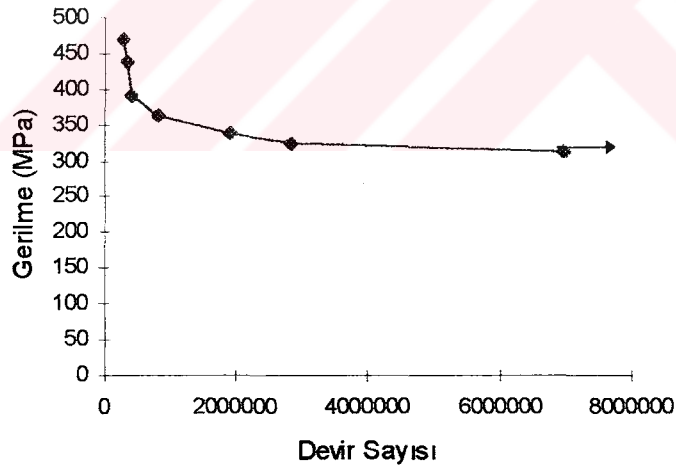
Isıl İşlemsiz		Ön Tavlama (350 °C)		Temperlenmiş (700 °C)	
Devir Sayısı	Gerilme (MPa)	Devir Sayısı	Gerilme (MPa)	Devir Sayısı	Gerilme (MPa)
102200	440	238000	440	309400	468
103600	405	252000	405	377000	439
105000	395	400000	395	418600	390
113000	375	1192000	375	851500	364
189000	355	1500000	355	1950000	338
600000	320	2250000	350	2860000	325
5350000	305	6000000	345	7000000	312



Şekil 6.14. Isıl İşlemsiz Numunenin Yorulma Eğrisi



Şekil 6.15. Ön Tavlı Numunenin Yorulma Eğrisi



Şekil 6.16 Temperlenmiş Numunenin Yorulma Eğrisi

7. BÖLÜM

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

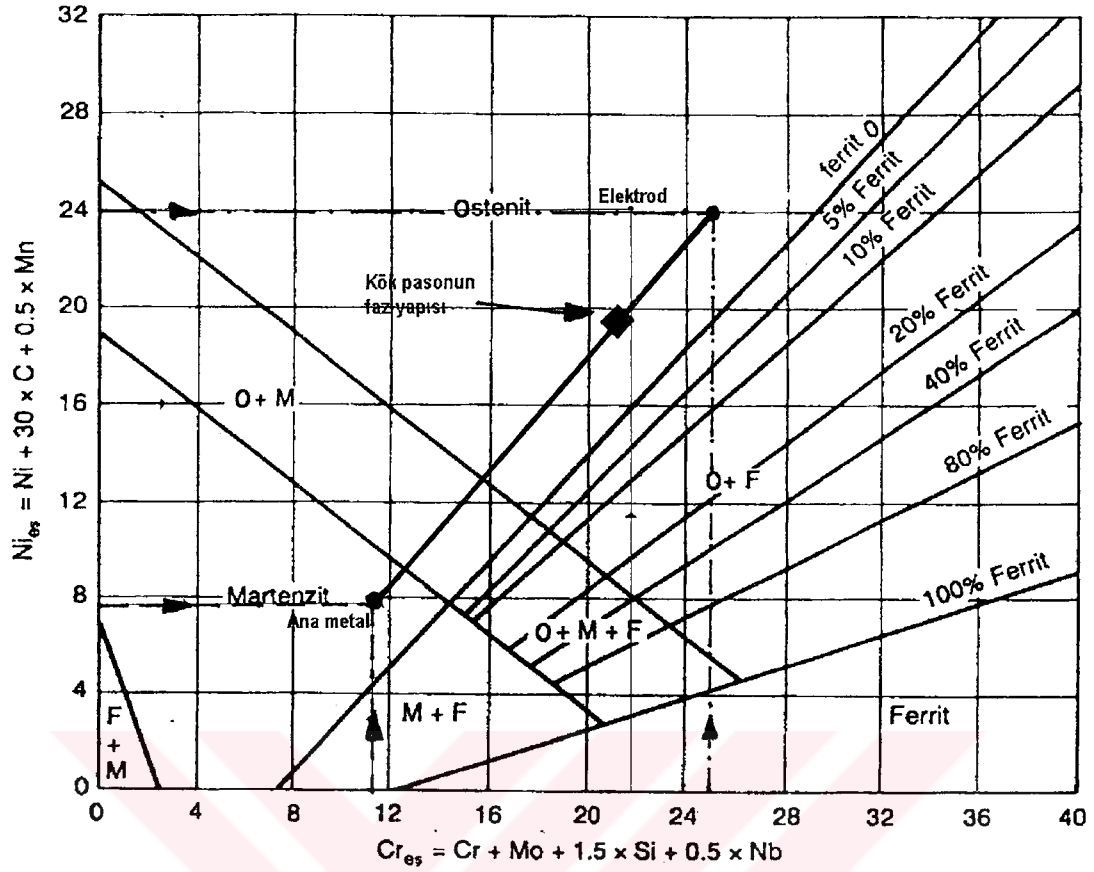
7.1. Metalografik Sonuçların Değerlendirilmesi

Kaynak edilen numunelerde, dikişte meydana gelen yapıları değerlendirmek amacıyla, Schaeffler diyagramından yararlanılmıştır. Bu maksatla, hem ana metalin hem de ilave metalin nikel ve krom eşdeğerleri hesaplanmış, bulunan değerler Schaeffler diyagramında işaretlenmiş, elektrod ve ana metali temsil eden noktalar birleştirilmiştir. Dikişte kök pasoda ana metalin katkısının % 30 olacağı dikkate alınarak (Metals Handbook, 1993), birleştirme doğrusu üzerinde ana metali temsil eden noktadan elektrodu temsil eden noktaya doğru bu noktaları birleştiren doğrunun uzunluğunun %30'u kadar ilerlenmiş ve bu bölgedeki yapı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Hem yapılan bu hesaplama hem de mikro yapı fotoğraflarından dikişin her üç numunede de esas itibariyle ostenitten oluştuğu anlaşılmaktadır. Dikiş boyunca yapılan sertlik ölçümleri de bu sonucu doğrulamaktadır. Schaeffler diyagramında yapılan uygulama Şekil 7.1'de görülmektedir.

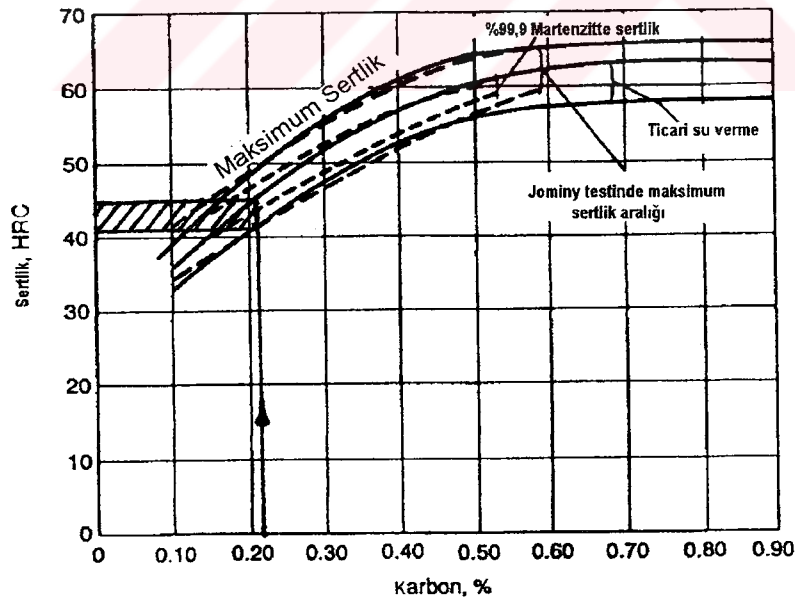
Buna göre ana metalin ve elektrodun krom eşdeğeri $Cr_{eş} = Cr + Mo + 1,5xSi + 0,5xNb$ formülünden, nikel eşdeğeri de $Ni_{eş} = Ni + 30xC + 0,5xMn$ formülünden bulunmuştur. Buna göre ana metalin $Cr_{eş} = 11,566$, $Ni_{eş} = 7,59$ olarak bulunmuş, öte yandan elektrodun ise $Cr_{eş} = 25,6$ ve $Ni_{eş} = 24$ olarak bulunmuştur.

Her numunenin ITAB'si incelendiğinde aşağıdaki hususlar görülmektedir:

1. Her üç numunede de ITAB'ın dikişe komşu kısmında martenzit ve kalıntı ostenit vardır. Martenzitin varlığı, bu bölgede yapılan sertlik ölçüm sonuçlarından da anlaşılmaktadır. C oranına bağlı olarak martenzitin sertliğini veren diyagramdan, bu kısımda oluşan yapının ölçülen sertliğe göre martenzit olduğu görülmektedir (Şekil 7.2). ITAB'da dikişe komşu bölgede oldukça fazla sayıda kalıntı ostenit bulunduğu da mikroyapı fotoğraflarından anlaşılmaktadır (Şekil 7.3).



Şekil 7.1. Schaeffler Diyagramı Yardımıyla Dikişin Mikroyapısının Belirlenmesi.



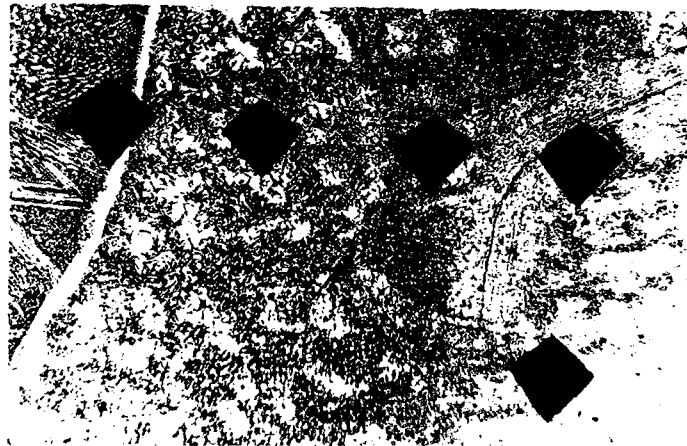
Şekil 7.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerde Karbon Oranına Bağlı Olarak Oluşan Yapının Sertlik Değerleri.



(a)



(b)



(c)

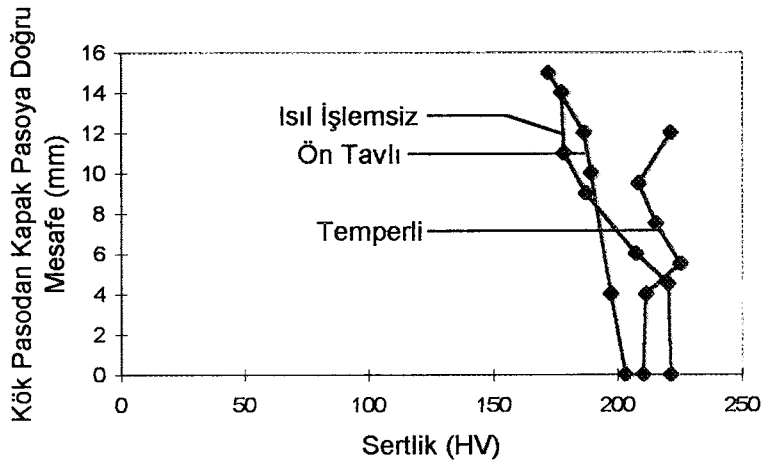
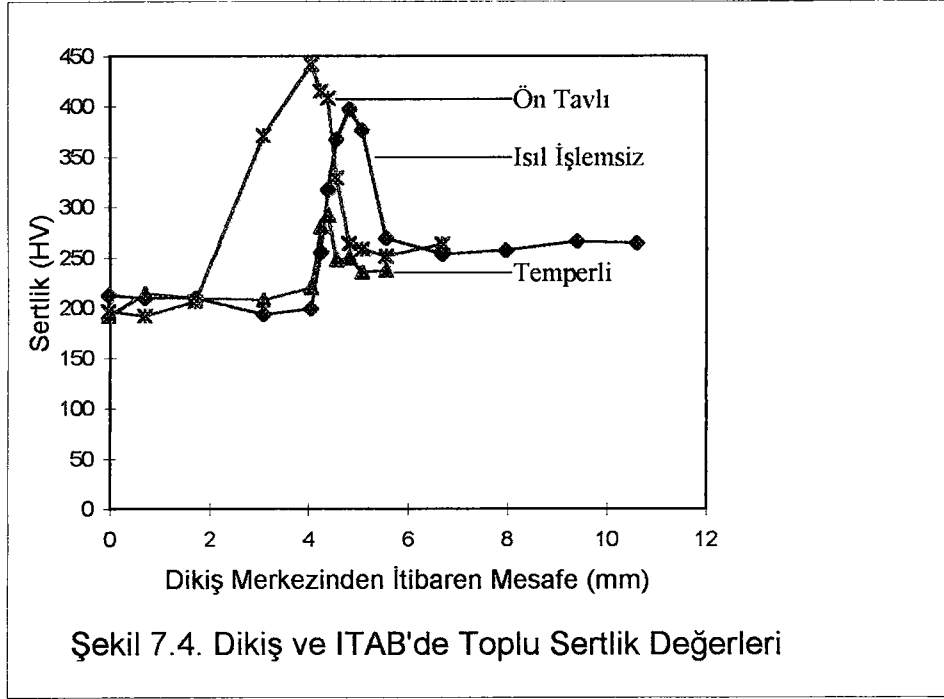
Şekil 7.3. Kaynaklı Numunelerin ITAB'lerinde Mikroyapılar. a. Isıl İşlemsiz, b. ÖnTavlı, c. Temperli (x100).

2. Martenzitin yapısına bakıldığında, ısıtıl işlem görmemiş numunede martenzitin daha ince yapıda olduğu ve kalıntı ostenit miktarının çok fazla olmadığı görülmektedir. Ön tavlı numunede kalıntı ostenit miktarı temperli numuneden daha fazladır.
3. ITAB'da oluşan martenzit , ısıtıl işlem görmemiş numunede tam lath martenzit iken, ön tavlı ve temperlenmiş numunede plate martenzite dönüşmektedir. Temperlenmiş numunedeki martenzit ise yine sertlik değerlerinin ortaya koyduğu gibi temperlenmiş martenzittir.

7.2.Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sertlik değerleri toplu olarak Şekil 7.4 ve 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.4 numunelerin ITAB'ındaki, Şekil 7.5 de dikişlerindeki toplu sertlik dağılımını göstermektedir. Buna göre:

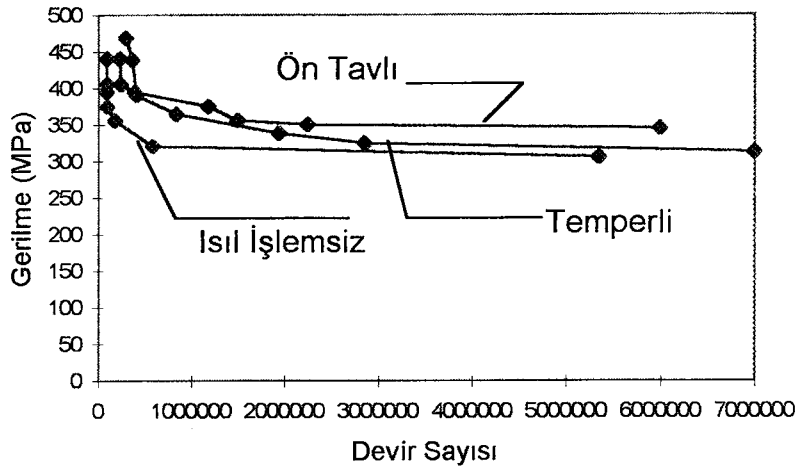
1. Literatürde belirtildiği gibi, ön tavlamanın ITAB'ın sertliğini azaltmadığı (Metals Handbook, 1993) görülmektedir. Yalnız, soğuma hızı düştüğü için kalıntı ostenit miktarı artmıştır.
2. Temperleme işlemi, martenziti temperlediğinden, ITAB'ın sertliğini belirgin bir şekilde azaltmıştır. Yine temperleme etkisi nedeniyle, sertliğin maksimum olduğu alan daralmıştır.
3. Ana metalin sertliğinin matrisi oluşturan ferrit nedeniyle, yaklaşık olarak 250 HV civarında olduğu görülmektedir.
4. Dikişte sertlik, kök pasodan kapak pasoya doğru, bütün numunelerde azalma göstermektedir. Yalnız, pasolararası bu sertlik farkı çok büyük olmadığı için, anlamlı değildir. Kök pasodaki daha yüksek sertlik değerine, kök pasoda ana metalin katkısının daha büyük olmasının yol açtığı söylenebilir. Kullanılan ostenitik karakterli elektrod nedeniyle dikiş ostenitten oluşmaktadır.



Şekil 7.5. Dikişte Toplu Sertlik Değerleri Toplamı

7.3.Yorulma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Her üç numuneye ait toplu yorulma sonuçları Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. Toplu Yorulma Eğrileri

Şekil 7.6'dan görüldüğü gibi yorulma dayanımı en yüksek olan numune ön tavlama uygulanmış olan numunedir. Bunu temperlenmiş ve ısıt işlemsiz numune izlemektedir.

Yorulma dayanımı esas alınarak, aşağıdaki formüllerden yorulma ya da dayanım oranı ve ısıt işlemsiz numuneye göre yorulma dayanımındaki bağıl artış oranına göre yapılan hesaplamada ise aşağıdaki sonuç elde edilmiştir.

$$\text{Yorulma Oranı} = \sigma_{\text{yorulma}} / \sigma_{\text{çekme}}$$

$$\text{Yorulma Oranındaki Artış} = \frac{1.\text{numunenin yorulma oranı} - 2.\text{numunenin yorulma oranı}}{2.\text{numunenin yorulma oranı}}$$

Buna göre, ön tavlı numune ısıt işlemsiz numuneye göre % 7.8 daha fazla bir bağıl yorulma dayanımına sahip iken, temperlenmiş numune ısıt işlemsiz numuneden % 43, ön tavlı numuneden % 32 daha fazla bir bağıl yorulma dayanımına sahiptir.

Temperlenmiş numunenin yorulma davranışının diğer numunelerden daha gelişkin olması:

- a. Dikişteki sertliğin diğer numunelerden yüksek ve
- b. ITAB'nin sünekliliğinin diğer numunelerinkinden daha iyi olmasına bağlanabilir.
- c. Numunelerde sertlik gradiyentinin azalması yorulma ömrünü arttırmaktadır.

7.4. Değerlendirme ve Öneriler

Sonuç olarak:

1. AISI422 grubu martenzitik paslanmaz çelikten yapılmış millere ostenitik karakterli paslanmaz çelik elektrod kullanılarak örtülü elektrod kaynak yöntemi ile dolgu kaynağı uygulanabilir.
2. Bu çeliğin kaynaklı bağlantılarının mekanik özellikleri ön tavlama ve temperleme ile geliştirilebilir.
3. Dolgu kaynağı yapılmış AISI 422 grubu martenzitik paslanmaz çelik millerin yorulma davranışları ön tavlama ve kaynak sonrası temperleme ile geliştirilip yorulma ömürleri uzatılabilir.
4. AISI 422 martenzitik paslanmaz çelikten yapılmış miller yukarıda belirtilen tedbirleri almak şartıyla çok paso uygulanıp dolgu kaynağı yapılarak onarılabilir.

Yapılan bu çalışma ile ilgili olarak bundan sonra aşağıda belirtilen hususlar da incelenebilir:

- a. Kaynaksız AISI 422 çeliği ile kaynaklı bağlantılarının yorulma davranışları, ısıtılma işlem uygulamak şartı ile karşılaştırılabilir.
- b. Bu çeliklerin kaynaklı bağlantılarının yorulma davranışları üzerinde elektrod cinsi ve kaynak yönteminin etkisi araştırılabilir.
- c. Yorulma davranışı kaynaklı bağlantıdaki gerilmelerin tamamen giderilmesi amacıyla hem kaynak öncesi hem kaynak sonrası temperleme yapılarak incelenebilir.
- d. Yine bu tür bağlantılarda, yorulma davranışı kaynak öncesi ön tav kaynak sonrası temperleme birlikte uygulanarak araştırılabilir.

8.KAYNAKÇA

1. ANIK, S., (1991). **Kaynak Tekniği El Kitabı**, Gedik Holding, İSTANBUL.
2. **As Kaynak Dergisi**, (1987). As Kaynak Yayınları, İSTANBUL
3. **ASM Handbook Volume 6**, (1993), p. 431-442.
4. **BARGEL, H.J., SCHULZE, G.** (1980). Werkstoffkunde S.119-121, 355-361 VDI-Verlog, GmbH DÜSELDORF.
5. ÇANAÇIK, A., ÇATALGÖL, Z., YÜKLER, İ., (1997), **Çeliklerde ITAB Sertlik Ölçümü**, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, s. 220-223, DENİZLİ.
6. ÇELİK, A. Ş., (1995), **Sementasyon İşleminin Yorulma Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması**, Yüksek Lisans Tezi, ISPARTA.
7. ÇİMENÖĞLU, H., S. KAYALI, (1986). **Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları**, İ.T.Ü., İSTANBUL.
8. DATTOMA,V., (1990), **Investigation of the Fatigue Behaviour of Welded Joints Treated After Welding**, Welding International 4.
9. DIETER, GEORGE, E., (1994). **Mechanical Metallurgy**, p. 375-431, University of Maryland.
10. **DIN Handbook 8 Welding**, (1991). 1 Beuth.
11. DORUK, M.,(1987). **Paslanmaz Çelikler**, SEGEM, ANKARA.
12. DOWLING, E., N., (1993). **Mechanical Behaviour of Materials**, Prentice Hall, NEW JERSEY.
13. ESİN, A. (1981). **Proferties of Materials for Mechanical Design**, s. 280-420, Middle East Technical University, GAZİANTEP.
14. ERYÜREK, İ. B., (1991) **Çeliklerin Örtülü Elektrodla Ark Kaynağında Elektrod Seçimi**, İSTANBUL.

15. GEORGE, E. L., (1996). **Common Welding Problems**, Fatigue Welding Journal-59.
16. GÜLEÇ, S., ARAN, A. (1983). **Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı**, TÜBİTAK, GEBZE.
17. GÜLTEKİN, N., (1985). **Kaynak Tekniği**, Y.Ü. sayı 184 İSTANBUL.
18. GÜRLEYİK, M. Y., (1983). **Kaynak Tekniği**, (Tercüme) K.T.Ü. TRABZON.
19. GÜVEN, Ş. Y., DELİKANLI, K., KORKMAZ, S., (1997), **Ç 1045 Çeliğinde Isıl İşlem Parametrelerinin Yorulma Limiti Üzerine Etkileri**, s. 429-432, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, DENİZLİ.
20. HAKSEVER, A. (1995). **Korozyon Yüksek Lisans Ders Notları**, ELAZIĞ.
21. KALUÇ, E., (1986). **Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı**, Y.Ü. Lisans Üstü Yaz Okulu, İSTANBUL.
22. **Kaynak Dünyası Dergisi**. (1990). Böhler Yayınları. Ocak, İSTANBUL.
23. KÖSE, R., SALMAN, S., (1996). **Millere Uygulanan Dolgu Kaynaklarında Sertlik Değerlerinin Isıl İşlemli ve Isıl İşlemsiz Olarak Değerlendirilmesi**, G.E.V., İSTANBUL.
24. KURBAN, A. O., (1993). **Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler**, 5. Denizli Malzeme Sempozyumu DENİZLİ.
25. LIPPOLD, J.C., (1984). **The Effect of Postweld Heat Treatment on the Microstructure of the Heat Affected Zone in 12 Cr-1Mo-0.3V (HT9) Weldments**, Proceed. Topical Conference on Ferritic Alloys for Use in Nuclear Energy Technologies, TMS.
26. MADDOX, S.J., (1991), **Recent Advances in the Fatigue Assessment of Weld Imperfections**.
27. MOORE, H. F., KOMMERS, J. B., (1972). **The Fatigue of Metals**, McGraw Hill, NEW YORK.

28. Nquyen, N.T ve Wahab, M.A., (1991). **The Effect of Residual Stresses on Fatigue of Butt Joints**, AUSTRALIA.
29. OĞUZ, B., (1972). **Ark Kaynağı**, Oerlikon Yayınları, İSTANBUL.
30. ORHAN,N., (1997). **Malzemelerin Yorulması Yüksek Lisans Ders Notları** ELAZIĞ.
31. ÖZDEN,N., (1985). **Kaynağın Isıl İşlemi**, İSTANBUL .
32. POTLURI, N.B., GHOSH, P.K., GUPTA, P.C ve REDDY, Y.S., (1996). **Studies on Weld Metal Characteristics and Their Influence on Tensile and Fatigue Properties of Pulsed-Current GMA Welded Al-Zn-Mg Alloy**, INDIA.
33. ROBAKOWSKI,T., (1984). **Effect of Height of Reinforcement Bead on Fatigue Strengths of Butt Joints With Internal Defects**, Welding International NO.4
34. ROBAKOWSKI, T., CZUCKHRYL, J., (1991). **The Effect of Additional Static Load on The Fatigue Strength of St.3w Welded Joints**. Welding International.
35. TEKİN, A., (1981). **Çeliklerin Metalurjik Dizaynı**, İSTANBUL.
36. TEKİN,E., (1986). **Mühendisler için Çelik Seçimi**, ANKARA .
37. TS 1487, (1974). **Metallerin Yorulma Deneyi Genel Prensipleri**, ANKARA.
38. TS 7706, (1989). **Kaynak İlave Metallerin Deneyi-Kaynak Metali Numuneleri Yardımıyla Ark Kaynaklı Deney Parçalarının Mekanik ve Teknolojik Deneyleri**, TSE, ANKARA.
39. WASSERMANN, G. (1965). **Praktikum der Metallkunde Und Werkstoffprüfung**, s.232-237 Pringer Verlag, BERLİN / HEİDEBERG / NEW YORK.
40. **Welding Handbook**, (1996). V. 4, AWS.
41. YILDIRIM ,M.M, (1989). **Tahribatlı ve Tahribatsız Malzeme Muayene Yöntemleri**, ELAZIĞ.
41. **Welding Handbook Sevent Edition**, (1984). Volume 4, p. 87-93, MIAMI.